



REABILITAÇÃO SUSTENTÁVEL DE INFRAESTRUTURAS RODOVIÁRIAS – ESTUDO DE CASO DE UM PROJETO DE MISTURAS RECICLADAS COM BETUME-ESPUMA

ER243 – ACESSIBILIDADE À ZONA INDUSTRIAL DE RIACHOS

Hugo Silva¹, Joel Oliveira², Anabela Martins¹, José Santos⁴, Patrícia Salvador⁵, Rafael Almeida⁶, João Carvalho⁷, Francisco Castro⁸

¹ Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, hugo@civil.uminho.pt

² Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, joliveira@civil.uminho.pt

³ Infraestruturas de Portugal S.A., Almada, Portugal, anabela.martins@infraestruturasdeportugal.pt

⁴ Infraestruturas de Portugal S.A., Almada, Portugal, jose.cmsantos@infraestruturasdeportugal.pt

⁵ Infraestruturas de Portugal S.A., Almada, Portugal, patricia.salvador@infraestruturasdeportugal.pt

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

⁷ Construções Pragosa S.A., Porto de Mós, Portugal, joao.carvalho@pragosa.pt

⁸ Construções Pragosa S.A., Porto de Mós, Portugal, francisco.castro@pragosa.pt

Resumo

Após décadas de investimentos na implementação do Plano Rodoviário Nacional (PRN2000), a atual estratégia da administração rodoviária prioriza a conservação da Rede Rodoviária Nacional com escassos recursos financeiros. Assim, perante os objetivos de desenvolvimento sustentável da Agenda 2030 da ONU e do novo “Plano de Ação para a Economia Circular” da Comissão Europeia de 2020, o grande desafio passa por preconizar soluções de reabilitação de pavimentos com uma elevada taxa de reutilização, valorização e reciclagem de todos os materiais existentes, em oposição ao modelo linear que conduziu a fase anterior de construção das infraestruturas rodoviárias. Uma das técnicas mais eficazes para alcançar esses desígnios é a reciclagem de pavimentos existentes, em particular quando todo o material das estruturas de pavimentação é aproveitado e a produção é feita à temperatura ambiente, com elevados ganhos energéticos e alto contributo para a descarbonização do setor. O presente estudo de caso pretende apresentar a técnica de reciclagem a frio com betume-espuma, em central, com o aproveitamento total das misturas betuminosas de um pavimento muito degradado, destacando a fase de estudo prévio dessa solução e o dimensionamento das estruturas de pavimento para várias classes de tráfego. Ainda são apresentadas algumas considerações relativas ao controlo de qualidade da camada reciclada, e faz-se uma breve descrição do trecho experimental de validação desta solução. Concluiu-se que esta solução mais sustentável de reciclagem a frio pode ser utilizada para vários níveis de tráfego, e em especial para níveis inferiores a T2. A mistura reciclada cumpriu os requisitos de desempenho exigidos em laboratório, e a camada reciclada aplicada no trecho experimental apresentou um adequado aspeto superficial. Deve evitar-se a aplicação em tempo chuvoso, pois pode ocorrer desagregação superficial da camada reciclada após abertura ao tráfego caso não se aplique uma mistura a quente para sua proteção.

Palavras-chave: reciclagem a frio em central; betume-espuma; dimensionamento de pavimento; trecho experimental.

1 Introdução

A reciclagem de misturas betuminosas a frio tem ganho destaque como uma alternativa ambientalmente sustentável à produção tradicional de misturas betuminosas a quente. O processo envolve a reutilização de material fresado do pavimento existente sem a necessidade de temperaturas elevadas, reduzindo o consumo de energia e as emissões de gases com efeito de estufa. A reciclagem a frio, particularmente quando se utiliza betume-espuma, é uma abordagem inovadora que melhora a reciclabilidade dos materiais betuminosos [1].

A tecnologia de espuma de betume desempenha um papel fundamental na reciclagem de misturas a frio. Este processo envolve a injeção de água e ar no betume quente, criando neste uma consistência espumosa que apresenta uma melhor trabalhabilidade e excelentes propriedades de revestimento dos agregados, tornando-a ideal para aplicações a temperaturas mais baixas para reciclagem de materiais betuminosos. A tecnologia melhora as propriedades de ligação do betume e contribui para um melhor revestimento dos agregados [2].

Alguns estudos de investigação têm demonstrado, consistentemente, o impacto positivo da espuma de betume no desempenho das misturas betuminosas a frio. Estes estudos avaliam parâmetros como a rigidez, a resistência à fadiga, a resistência ao desgaste e a suscetibilidade à água. Os resultados indicam que as misturas betuminosa a frio com espuma de betume podem apresentar um desempenho comparável ou superior ao das misturas tradicionais produzidas a quente com betume [3].

O sucesso da reciclagem de misturas betuminosas a frio com betume-espuma está intimamente ligado a uma formulação adequada da mistura, o que inclui a determinação do teor ideal de espuma de betume e a granulometria dos agregados. Estas considerações são cruciais para alcançar o desempenho desejado na misturas betuminosa reciclada [1].

De referir que este trabalho surge na sequência de um caso de estudo anterior de reciclagem a frio *in situ* com betume espuma efetuado em Portugal, no qual foram obtidos resultados satisfatórios que levaram a explorar mais esta tecnologia. A utilização de reciclagem a frio em central neste novo trabalho procurou dar resposta a alguma heterogeneidade do material reciclado observada nesse trabalho anterior [4; 5].

A reciclagem de misturas betuminosas a frio com espuma de betume é ainda reconhecida pelas suas vantagens ambientais e económicas. Alguns estudos têm destacado a redução do consumo de energia, a diminuição das emissões de gases com efeito de estufa e a redução de custos como principais benefícios. O processo alinha-se com os objetivos de sustentabilidade, conservando recursos e mitigando o impacto ambiental associado à produção tradicional de misturas betuminosas a quente. Estudos de caso bem-sucedidos apoiam ainda mais a implementação prática desta tecnologia em cenários do mundo real [6].

2 Caso de estudo da ER243 – Acessibilidade à zona industrial de Riachos

2.1 Enquadramento do caso de estudo

O caso de estudo “ER243 – Acessibilidades à Zona Industrial de Riachos – Beneficiação” apresentado neste artigo consiste no projeto de beneficiação, reabilitação e retificação de dois trechos da ER243 e uma nova ligação à Zona Industrial do Entroncamento, para se obter uma melhoria significativa das condições de circulação, segurança rodoviária e durabilidade da infraestrutura viária. As vias a intervir situam-se no distrito de Santarém, nos concelhos de Torres Novas e Entroncamento. A estrada a intervir pode ser segmentada em três troços (Figura 1):

- 1) Troço 1 do Torreshopping e entre a rotunda 1 e 2 com 1737 m de extensão;
- 2) Troço 2 da rotunda 2 à linha férrea (inclui novas rotundas 4 e 5) com 2200 m de extensão;
- 3) Troço de Acesso à Zona Industrial de Riachos co 1425 m de extensão (que incluem cerca de 600 m de troço novo).

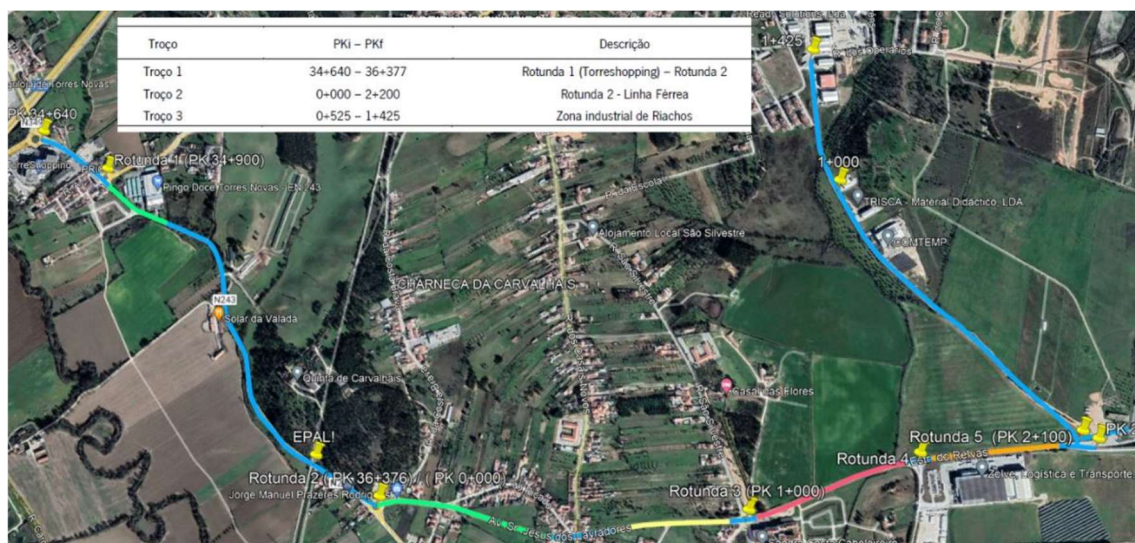


Figura 1. Localização da estrada a intervir (caso de estudo)

2.2 Solução de pavimentação inicialmente prevista em projeto e condicionalismos construtivos

A solução de pavimentação inicialmente preconizada em projeto englobava duas grandes intervenções estruturais:

- Remoção integral da estrutura de pavimento existente e posterior reconstrução da mesma (solução com 0,90 m de espessura) nas zonas de retificação e de novo traçado;
- Nas restantes zonas de intervenção, numa perspetiva de reforço, previa-se a fresagem das camadas com misturas betuminosas a quente (espessura média de 0,13 m a 0,17 m), e subsequente execução de três camadas betuminosas numa espessura total de 0,17 m.

Devido à presença de um traçado denso em infraestruturas existentes (e.g., eletricidade, gás, ITED e águas pluviais), na sua generalidade instaladas a pouca profundidade (0,50 a 0,70 m) em relação à cota da rasante da estrada, concluiu-se que o risco de afetação destas infraestruturas em zonas com remoção integral da estrutura de pavimento era mais significativo. A implantação do processo construtivo inicialmente previsto consubstanciaria outras dificuldades de execução, salientando-se que o desnível de 90 cm entre a plataforma existente e a plataforma de trabalho aumentaria o risco de acidente na circulação rodoviária e a insegurança dos trabalhadores. O período de condicionamento no acesso às propriedades seria muito prolongado, e os tempos de espera prolongados para os utilizadores da via em circulação alternada.

2.3 Nova solução de pavimentação com reciclagem a frio em central com betume-espuma

Tendo presente o enquadramento anterior, no projeto da ER243 optou-se por aplicar um método construtivo inovador que recorre à tecnologia de reciclagem a frio para reabilitar pavimentos degradados. No caso em estudo, o processo construtivo envolve a utilização de uma central móvel da Wirtgen (KMA240i) para reciclagem a frio, utilizando betume-espuma e outros aditivos (cimento e filler), além da totalidade do material betuminoso fresado proveniente do trecho a reabilitar (ER243 em Riachos). Assim, propõe-se um novo dimensionamento da estrutura de pavimento com essa camada reciclada a frio e que garanta a equivalência ao projeto original, em termos capacidade de tráfego a suportar, tal como se explica neste artigo.

Esta tecnologia inovadora em Portugal reutiliza o material existente na estrada, reduz a necessidade de importação de novos materiais e não gera resíduos para aterro, sendo um exemplo prático de aplicação dos princípios da economia circular à construção rodoviária.

Esta tecnologia de reciclagem a frio nos pavimentos vai ao encontro ao objetivo doze de desenvolvimento sustentável das Nações Unidas [7], que pretende garantir o uso eficiente de

recursos naturais pela gestão sustentável, bem como reduzir a produção de resíduos até 2030. A União Europeia também considerou prioritário o tratamento dos fluxos dos resíduos de construção e demolição no seu Plano e Ação para a Economia Circular [8] para atingir as metas de redução de emissões de gases com efeito de estufa. Nessa lógica de economia circular, e conforme Decreto-Lei n.º 102D/2020, desde 2021 encontra-se prevista a obrigatoriedade de utilizar 10% de materiais reciclados ou que incorporem materiais reciclados relativamente à quantidade total de matérias-primas usadas na construção e manutenção de infraestruturas ao abrigo do Código dos Contratos Públicos em Portugal.

De acordo com a Wirtgen [9], uma mistura reciclada a frio pode ser fabricada quer a partir de 100% do material betuminoso fresado, quer a partir de material granular britado ou uma mistura dos dois elementos. A matéria-prima é depois misturada mecanicamente a frio (*in situ* ou em central) com betume-espuma (ligante), cimento ou cal (fíler ativo), água e, eventualmente, material inerte fino (para correção granulométrica). Esta solução é adequada para camada de base de pavimentos cuja camada de desgaste deve ser uma mistura betuminosa a quente. Esta técnica de reabilitação tem várias vantagens em relação às soluções tradicionais:

- Solução célere com rendimentos elevados (encurtamento do prazo de execução);
- Garantia de durabilidade (não é uma solução de curto-prazo);
- Menos tempo de espera para abertura ao tráfego e constrangimentos às populações;
- Reutilização dos materiais existentes e redução de custos (menos transportes, não são necessários vazadouros, menos importação de novos materiais);
- Solução amiga do ambiente com menores emissões de CO₂;
- Camada pode ser reciclada novamente.

3 Estudo prévio em laboratório da mistura reciclada a frio com betume-espuma

3.1 Caracterização do material fresado recuperado do pavimento

A curva granulométrica do material fresado permite avaliar a sua adequabilidade para produção de uma mistura reciclada a frio com betume-espuma. Com base nos fusos definidos no manual da Wirtgen [9] é possível perceber se o material necessita de alguma correção granulométrica, através da adição de material na fração em falta. O fuso granulométrico médio obtido pelo método de peneiração e após secagem em estufa é apresentado na Figura 2.

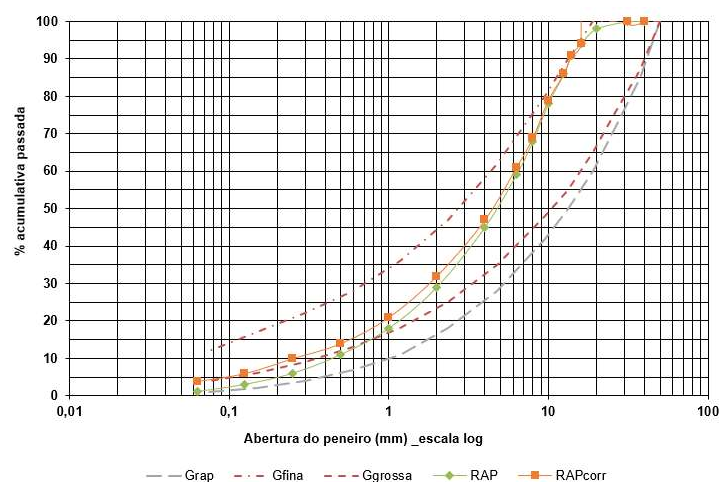


Figura 2. Granulometria do material fresado antes (RAP) e após correção com fíler (RAPcorr) e fuso granulométrico alvo (Gfina e Ggrossa) e o fuso típico de material fresado (Grap)

Genericamente, o material fresado está dentro do fuso alvo, denotando-se, no entanto, pouca quantidade de fração fina passada no peneiro #0,063 mm disponível para o betume-espuma assegurar a necessária coesão da mistura reciclada a frio. Com vista a suprir a carência identificada optou-se por corrigir a mistura com 4% de filer comercial calcário 0/0,250 mm, conforme apresentado na Figura 2.

O teor de água presente no material fresado influencia a quantidade de água a adicionar para produção e compactação da mistura reciclada e, como tal, terá de ser constantemente aferido no *stock* de material ao longo da obra. No entanto, para efeito de formulação inicial da mistura reciclada a produzir, determinou-se o teor em água ótimo para a compactação através do ensaio de Proctor modificado (valor médio de 5,5%). Na produção das misturas recicladas, e em função da humidade do material fresado, deve adicionar-se água extra para atingir um teor próximo do ótimo de Proctor, mas ficando no ramo seco da curva para evitar problemas de estabilidade. Durante a compactação é possível adicionar-se alguma água para assegurar a necessária trabalhabilidade do material reciclado.

3.2 Formulação das misturas recicladas com betume-espuma em laboratório

Para produzir betume-espuma em laboratório, utilizou-se o equipamento Wirtgen WLB10S (Figura 3) da Universidade do Minho, que simula a produção de betume-espuma à escala industrial. Este equipamento permite controlar a quantidade de água, pressão do ar e temperatura do betume para expandir o seu volume (Figura 3) de forma exponencial.



Figura 3. Equipamento Wirtgen WLB10S (esquerda) e betume-espuma produzido (direita)

Com base no *know-how* da Wirtgen definiu-se previamente as seguintes condições para a produção de betume-espuma: o teor de água a adicionar ao betume para este espumar é de 2,5% por massa de betume, a gama de penetração do betume é do tipo 70/100 e a temperatura do betume deve ser de 170 °C. O tipo de betume escolhido 70/100 (penetração de 74×10^{-1} mm e temperatura de amolecimento de 47 °C), da Repsol, está essencialmente relacionado com a sua baixa viscosidade, pois isso facilita a sua expansão [2].

O estudo de formulação avalia qual a percentagem ótima de betume-espuma a considerar para a mistura a reciclar. Foram realizadas amassaduras experimentais com percentagens de betume-espuma que variaram entre 2,2% e 2,6% por massa da mistura. O referido intervalo de valores baseou-se no manual da Wirtgen [9], que também refere a necessidade de adicionar uma pequena quantidade de filer ativo à mistura (cimento ou cal) para melhorar as condições de cura do material. O material definido neste estudo foi o cimento, pelo facto do pavimento a executar ter requisitos de rigidez mais elevados para atingir os critérios de dimensionamento. A quantidade de cimento pode variar entre 1% e 2% para reduzir o risco de retração observado em materiais estabilizados com maiores quantidades de cimento, tendo-se optado pelo valor de 2% devido aos requisitos de rigidez já indicados.

Uma vez definida a composição das misturas recicladas a estudar, procedeu-se ao ensaio de compactação de Marshall (75 pancadas por face) de forma a fabricar seis provetes por percentagem de betume-espuma adicionada (2,2%, 2,4% e 2,6%). Após compactação, os provetes foram desmoldados e pesados no dia a seguinte (Figura 4), sendo depois colocados em estufa por 72 horas a uma temperatura constante de 40 °C para simular o processo de cura do material in situ, sendo evidente a perda de massa por evaporação da água neste processo.



Figura 4. Provetes Marshall (esquerda) e lajeta (direita) de mistura reciclada a frio produzidas em laboratório durante o estudo de formulação

Seguindo o mesma composição das amassaduras anteriormente descritas, foi moldada uma lajeta de material reciclado a frio (Figura 4) utilizando o equipamento de compactação *roller compactor*. Esta lajeta só foi produzida para a percentagem ótima de betume-espuma a indicar em seguida como resultado da resistência à tração indireta e da resistência conservada. Ao final de uma semana (que incluiu a cura durante 72 horas a 40 °C) foi possível cortar vigas a partir da laje moldada para determinação do módulo de rigidez.

3.3 Caracterização das misturas recicladas com betume-espuma produzidas em laboratório

A principal propriedade mecânica para avaliar o desempenho das misturas recicladas a frio, segundo a metodologia Wirtgen [9], é a resistência à tração indireta (ITS) em ensaios realizados a 25 °C (EN 12697-23). O valor do ITS deve ser determinado para provetes em condições secas ITS_d e para provetes em condições molhadas ITS_w , e os respetivos valores relacionados por meio do ITS_R (rácio do valor do ITS_w pelo valor ITS_d em percentagem). Para determinar o valor do ITS_w condicionaram-se três provetes em água a 25 °C durante 24 horas.

Em termos médios, para as percentagens de betume de 2,2%, 2,4% e 2,6% obtiveram-se respetivamente os seguintes valores de ITS_w / ITS_d (ITS_R): 305 / 366 kPa (83%), 308 / 360 kPa (86%) e 316 / 359 kPa (88%). Os resultados obtidos em termos de resistência à tração indireta revelam resultados acima dos valores mínimos de referência indicados pela Wirtgen [9]. Ou seja, para as amostras produzidas e para as respetivas percentagens de betume-espuma adicionadas, o valor de ITS_w / ITS_d (ITS_R) são sempre superiores a 100 / 225 kPa (50%). Tais resultados transmitem um grau de confiança elevado para adequabilidade da solução a implementar, para as várias percentagens de betume-espuma ensaiadas. No entanto, para a implementação do processo construtivo selecionou-se a percentagem de betume-espuma de 2,6% (em massa) por se aquela que obteve melhores resultados em termos globais.

Para aprofundar a caracterização mecânica do material ao nível do tráfego que poderá suportar, determinou-se o módulo de rigidez do material reciclado com 2,6% de betume-espuma em laboratório. O módulo de rigidez do material reciclado com betume-espuma foi determinado em laboratório através do ensaio de flexão em quatro pontos segundo a AASHTO T321-07. O ensaio submete um provete prismático de secção retangular à flexão a 20 °C para uma gama de frequências que varia entre 0,1 e 10 Hz, para uma extensão entre picos de 100×10^{-6} . Na Figura 5

apresentam-se os valores médios do módulo de rigidez obtidos nas condições de ensaio referidas para dois tempos de cura diferentes (10 dias e 20 dias).

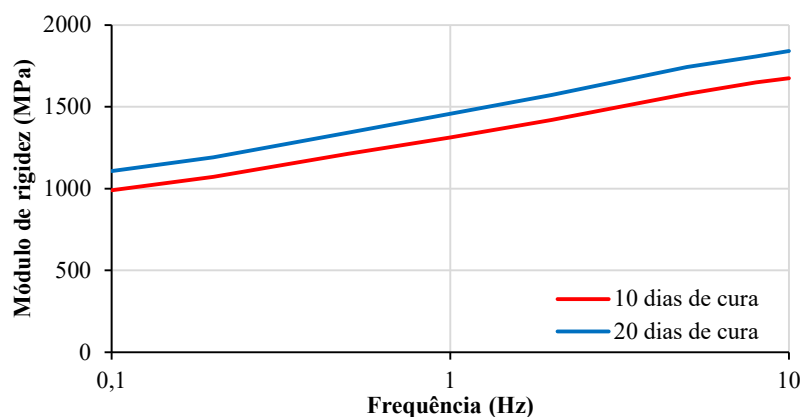


Figura 5. Valores médios do módulo de rigidez da mistura reciclada a frio com betume-espuma obtidos após 10 e 20 dias de cura

O manual da Wirtgen [9] apresenta valores de referência do módulo resiliente de misturas recicladas a frio com betume-espuma da ordem de 1000 MPa a 2000 MPa. Apesar deste parâmetro ser distinto do módulo de rigidez determinado em laboratório, permite confirmar que a composição estudada em laboratório tem um comportamento dentro do expectável.

4 Dimensionamento do pavimento com a mistura reciclada a frio com betume-espuma

4.1 Tráfego de dimensionamento

Para dimensionamento utilizou-se um eixo padrão de 130 kN e o tráfego de projeto (Ndim) foi determinado nas condições mais desfavoráveis para um período de 20 anos (Tabela 1).

Tabela 1. Tráfego de dimensionamento

Local	Tráfego	Ndim 130 kN
Secção [A]	T1 (1326)	8,92 milhões
Secção [B]	T2 (1024)	6,26 milhões
Secção [C]	T3 (663)	3,65 milhões
Secção [D]	T3 (512)	2,82 milhões
Secção [E]	T3 (512)	2,82 milhões
Secção [F]	T6 (103)	0,25 milhões
Secção [G]	T6 (103)	0,25 milhões

Antes de proceder ao dimensionamento das secções [A] e [B], que correspondiam a rotundas com uma pequena extensão e com um volume de tráfego muito elevado (T1 e T2), considerou-se que não fazia sentido estudar a solução de reciclagem a frio com betume-espuma para estes locais devido à combinação de uma reduzida extensão, elevado tráfego, cargas lentas e elevados esforços tangenciais. Assim, nestes locais manteve-se o projeto original.

4.2 Características mecânicas e espessuras das diferentes camadas do pavimento

Os valores dos módulos de rigidez da fundação e da camada granular (ABGE) do pavimento existente considerados no dimensionamento das diferentes secções basearam-se num estudo de

avaliação da capacidade de carga, complementados com abertura de poços de sondagem para a definição das espessuras totais das camadas granulares (ABGE) e betuminosas (Tabela 2).

Tabela 2. Módulos de rigidez e espessuras das camadas do pavimento existente

Local	Módulos de rigidez (MPa)		Espessura total (cm)	
	Fundação	ABGE	ABGE	Betuminosas
Secção [C]	150	250	30	16
Secção [D]	150	225	25	20
Secção [E]	150	250	45	15
Secção [F]	130	200	20	9
Secção [G]	Construção nova		Construção nova	

Os módulos de rigidez considerados para as novas camadas betuminosas a quente a aplicar em obra baseiam-se no projeto de execução inicial. Assim, considerou-se que a camada de desgaste em SMA tem um módulo de rigidez de 3200 MPa e a camada de ligação (MBQ) tem um módulo de rigidez de 3800 MPa. Importa ainda salientar que se considera a possibilidade de utilizar uma camada de regularização em AC12,5 reg 35/50 (MBQ também com 3800 MPa) quando a espessura da camada seja inferior a 4 cm.

As características mecânicas da camada reciclada a frio com betume-espuma (MRFBE) tiveram por base o estudo laboratorial já referido e um trabalho anterior relativo à utilização de reciclagem a frio *in situ* com betume-espuma [4; 5]. De facto, tendo em conta a evolução expectável do módulo de rigidez em obra para tempos de cura mais longos do que os utilizados em laboratório, considerou-se um módulo de rigidez de 2500 MPa para esta camada no dimensionamento das soluções de pavimentação com este material.

4.3 Leis de fadiga utilizadas para dimensionamento

O dimensionamento efetuado para validação das soluções alternativas de pavimentação baseou-se no método empírico-mecanicista, considerando as leis da Shell para limitação da extensão de tração da parte inferior das camadas betuminosas e da extensão de compressão na parte superior da fundação.

Nas novas soluções de pavimentação propostas com mistura reciclada a frio com betume-espuma, esta foi sempre considerada uma camada betuminosa ligada onde se efetua o controlo de extensões de tração. Considerou-se válida a utilização da lei de fadiga da Shell para estas camadas com as devidas adaptações. De forma conservativa, utilizou-se um volume de betume de apenas 8% para esta mistura. Este fator, juntamente com o módulo mais baixo da mistura reciclada, origina um aumento da espessura no processo de dimensionamento para garantir um adequado comportamento do pavimento em serviço.

Além disso, optou-se por propor ao longo de toda a extensão onde se prevê aplicar camadas recicladas, a sobreposição com duas camadas betuminosas a quente, para melhorar a regularidade superficial do pavimento e a resistência à ação direta do tráfego e do clima.

4.4 Soluções alternativas de projeto propostas

As soluções alternativas de pavimentação (espessuras das camadas) obtidas no dimensionamento efetuado nas condições atrás descritas para cada uma das secções em análise são apresentadas na Tabela 3. A primeira camada de mistura betuminosa a quente a executar sobre a superfície da camada reciclada terá funções de regularização, mas também terá uma função estrutural. Assim, salienta-se que as espessuras indicadas para a camada de ligação a executar nestes locais corresponde à espessura mínima a assegurar ao longo de cada um dos trechos analisados.

Com base nas espessuras e módulos de rigidez apresentados anteriormente, nos níveis de tráfego previstos para cada secção (Ndim), e as leis de fadiga já referidas, foi possível determinar o tráfego de cálculo expectável (Ncal), bem como o dano correspondente (Ndim/Ncal). A relação

entre estes valores de tráfego permitiu determinar o dano expectável ao fim de 20 anos de dimensionamento, que também são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Soluções alternativas de pavimentação e respetivo dano previsto para as secções com mistura reciclada a frio com betume-espuma

Local	Espessura das camadas do pavimento consideradas					Ncal (milhões EP 130 kN)	Dano (%)
	Desgaste (SMA)	Ligação ou Regularização (MBQ)	Reciclado a frio (MRFBE)	ABGE (Base)	ABGE (Sub-base)		
Secção [C]	4	5	15	-	30	4,5	81
Secção [D]	4	4	15	-	25	4,2	67
Secção [E]	4	4	15	-	40	3,7	76
Secção [F]	4	3	11	-	20	0,5	50
Secção [G]	4	3	11	20	20	3,6	7

Como se pode observar, todos os trechos asseguram um dano inferior a 81% ao fim do período de dimensionamento de 20 anos, o que permite referir que do ponto de vista da mecânica dos pavimentos, as soluções apresentadas são uma alternativa viável ao projeto de execução inicial.

5 Controlo de qualidade da mistura reciclada a frio com betume-espuma e execução de um trecho experimental

5.1 Considerações iniciais

A metodologia a implementar em obra relativamente ao controlo de qualidade e avaliação de desempenho do material reciclado a frio com betume-espuma envolve, em termos genéricos:

- Realização de um trecho experimental para validação das condições de execução e compactação da camada reciclada;
- Controlo de qualidade da camada reciclada e *stock* de fresado durante a execução;
- Recolha de material reciclado não compactado para ensaio em laboratório e controlo de qualidade do material aplicado;
- Realização de campanhas de ensaios ao pavimento construído após determinados períodos de cura do material (em princípio, superiores a um ou dois meses);
- Validação estrutural da solução executada em relação aos pressupostos de dimensionamento e aos requisitos apresentados no manual da Wirtgen [9].

5.2 Execução de um trecho experimental da mistura reciclada a frio com betume-espuma

Em dezembro de 2023 foi realizado um trecho experimental para arranque dos trabalhos de reciclagem, numa extensão superior a 300 m, de modo a definir as condições de realização dos trabalhos (e.g., funcionamento da central, adequação da composição laboratorial, espalhamento da camada com a pavimentadora, processo de compactação com cilindros de rolos lisos e de pneus para atingir a compactação desejada). Este trecho serviu ainda para validar o controlo de qualidade a realizar em obra. As condições meteorológicas em que se realizou o trecho não foram as ideais devido às baixas temperaturas (pouco acima de 10 °C) e à ocorrência de alguma precipitação. As misturas recicladas a frio devem ser aplicadas idealmente acima de 15 °C e com tempo seco, mas não foi possível adiar a realização deste trecho para não comprometer o arranque da obra.

A produção da mistura reciclada a frio (produção de 240 t/h) ficou a cargo de um equipamento especializado para o efeito, a central móvel KMA240i (Figura 6), montada no estaleiro de obra situado nas suas imediações. A central dispõe de um silo para cimento, um silo para o filer comercial, um depósito de água de grande capacidade e dois depósitos de betume com sistema de

manutenção de temperatura. O depósito de material fresado fica nas imediações da central móvel, para a garantir a fluidez das operações de carga de material fresado do *stock* para a tulha da central. Todo o material fresado é passado por um equipamento de desagregação e crivagem (Figura 6) para assegurar uma maior homogeneização e a inexistência de pedaços aglomerados que reduzam a qualidade do material reciclado a frio. De salientar a importância de controlar a expansão do betume-espuma na central durante a produção e a necessidade de ajustar a água a adicionar em função da humidade do material fresado para assegurar boa trabalhabilidade, mas sem exceder o teor ótimo de Proctor para evitar problemas de estabilidade da mistura reciclada.

Após produção do material reciclado a frio, a central carrega os camiões através de um tapete integrado, e estes transportam o material até à frente de obra para ser aplicado pela pavimentadora, num processo em tudo semelhante a uma pavimentação tradicional (Figura 7).



Figura 6. Central móvel KMA240i de produção da mistura reciclada a frio (esquerda) e equipamento utilizado para desagregação e crivagem do material fresado (direita)



Figura 7. Carregamento dos camiões com mistura reciclada a frio pela central KMA240i (esquerda) e pavimentadora a espalhar a camada reciclada na frente de obra (direita)

O processo de compactação da camada reciclada deve ser realizado inicialmente através da passagem sucessiva de cilindros de rasto liso de elevado peso (idealmente com mais de 10 t) equipados com vibração (Figura 8). Numa primeira fase a compactação é realizada sem vibração para obter uma camada mais regular, iniciando-se depois a compactação com vibração. Durante a compactação deve utilizar-se continuamente água para melhorar a trabalhabilidade e evitar que a mistura agarre ao cilindro. Se possível, devem utilizar-se sistemas inteligentes de controlo de compactação georreferenciada para garantir uma maior qualidade final da camada reciclada. Numa segunda fase deve aumentar-se o nível de compactação pela passagem de um cilindro de pneus (Figura 8), que já não deve originar marcas na camada devido ao elevado nível de compactação obtido com os cilindros de rasto liso. A aplicação de uma elevada energia de compactação pelo cilindro de rasto liso com vibração pode originar microfendilhamento do topo da camada reciclada, que deve deixar de ser visível após passagem do cilindro de pneus. Este aspeto superficial da mistura não reduz o seu desempenho, de acordo com a experiência da equipa da Wirtgen que esteve a suportar a realização do trecho experimental.



Figura 8. Compactação inicial da camada reciclada com cilindro de rastos lisos (esquerda), concluindo-se a compactação com um cilindro de pneus (direita)

O trecho experimental permitiu validar a composição estudada em laboratório, e demonstrou que a solução de reciclagem a frio com betume-espuma pode ser aplicada com sucesso desde que sejam utilizadas as práticas construtivas mais adequadas. Salienta-se neste processo a necessidade de ajustar a percentagem de água utilizada para espumar o betume de modo a assegurar uma elevada expansão, e também a importância de ajustar a quantidade de água adicionada à mistura reciclada em função da humidade do material fresado. As condições meteorológicas têm um papel muito importante no sucesso desta técnica. O trecho foi executado em dois dias diferentes, tendo chovido apenas no primeiro dia, sendo que essa parte do trecho apresentou desagregação superficial generalizada após abertura ao tráfego, ao contrário da parte do trecho realizada no segundo dia (Figura 9). Para evitar a evolução da degradação da camada reciclada durante o Inverno foi aplicada uma camada de regularização com 4 cm em todo o trecho.



Figura 9. Desagregação superficial da camada reciclada aplicada com chuva (esquerda) e aspeto superficial adequado da camada aplicada sem chuva (direita) após abertura ao tráfego

5.3 Controlo de qualidade da mistura reciclada a frio com betume-espuma

Durante a realização do trecho foram realizados vários ensaios DIP (defletómetro de impacto portátil) para avaliar a evolução da capacidade de carga da camada reciclada, antes e após a sua execução, e alguns dias após construção para avaliar o efeito da cura do material. Também se recolheram amostras não compactadas de material reciclado para realizar ensaios de tração indireta (ITS_d , ITS_w e $ITSR$) para diferentes tempos de cura, cujos resultados foram superiores aos limites indicados no manual da Wirtgen [9]. O objetivo destes ensaios é verificar se estes

métodos podem ser utilizados posteriormente para controlo de qualidade durante a obra, juntamente com os ensaios de granulometria, teor em água, e baridade com garrafa de areia.

Numa fase posterior do controlo de qualidade da obra, após concluída a sua construção, o controlo qualidade final do pavimento incluirá a realização de sondagens à rotação, poços de sondagem e ensaios com defletómetro de impacto (FWD) e de regularidade longitudinal (IRI). A recolha de amostras só pode ser realizada um a dois meses após concluída a obra, pois só nessa fase é possível obter amostras com coesão suficiente para ensaio. Os resultados de FWD ainda devem ser utilizados para determinar por análise inversa as características mecânicas do pavimento construído, para verificar se as mesmas confirmam as condições definidas em projeto.

6 Conclusões

O caso de estudo “ER243 – Acessibilidades à Zona Industrial de Riachos – Beneficiação” apresentado neste artigo procurou demonstrar a experiência recolhida no estudo de formulação, no dimensionamento e na realização de um trecho experimental com uma mistura reciclada a frio com betume-espuma em central, técnica utilizada de forma inovadora em Portugal.

Ao longo deste trabalho foi possível concluir que esta solução mais sustentável de reciclagem a frio com betume-espuma pode ser utilizada para vários níveis de tráfego, e em especial para níveis inferiores a T2, utilizando apenas 2,6% de betume-espuma e 2% de cimento e sem necessidade de aquecimento do material fresado. A mistura reciclada cumpriu os requisitos de desempenho exigidos em laboratório, e a camada reciclada aplicada no trecho experimental apresentou características superficiais adequadas aquando da sua aplicação. No entanto, verificou-se que se deve evitar a aplicação destas misturas em tempo frio e chuvoso, pois essas condições podem potenciar a ocorrência de desagregação superficial da camada reciclada após abertura ao tráfego caso não se aplique uma mistura betuminosa a quente para sua proteção.

Referências

- [1] Xiao, F., Yao, S., Wang, J., *et al.* (2018). A literature review on cold recycling technology of asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 180, 579-604.
- [2] Abreu, L., Oliveira, J., Silva, H., *et al.* (2017). Suitability of different foamed bitumens for warm mix asphalts with increasing recycling rates. *Construction and Building Materials*, 142, 342-353.
- [3] Gupta, L., & Kumar, R. (2023). Experimental investigation of reclaimed asphalt foamed bituminous mix: a cold mix technique. *World Journal of Engineering*, 20(4), 655-668.
- [4] Oliveira, J., Silva, H., Palha, C., *et al.* (2021). Estudo de um trecho experimental para reabilitação do pavimento da estrada ER 361 recorrendo à reciclagem a frio in situ através de estabilização com betume-espuma. Guimarães, Portugal: Universidade do Minho.
- [5] Correia, E., Silva, H., Oliveira, J., *et al.* (2022). Cold in-place stabilization with foamed bitumen in Portugal: case study on a rehabilitation work in the regional road ER361 between Amiais de Cima and Alcanena. In E. Toraldo & D. Bodin (Eds.), *Use of recycled materials in pavements - A PIARC case studies collection*. Paris, France: World Road Association (PIARC).
- [6] Luan, Y., Ma, T., Wang, S., *et al.* (2022). Investigating mechanical performance and interface characteristics of cold recycled mixture: Promoting sustainable utilization of reclaimed asphalt pavement. *Journal of Cleaner Production*, 369, 133366.
- [7] United Nations (2015). *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. New York, USA: United Nations.
- [8] European Commission (2020). *Circular Economy Action Plan for a Cleaner and More Competitive Europe*. Brussels, Belgium: European Union.
- [9] Wirtgen Group (2012). *Cold Recycling – Wirtgen Cold Recycling Technology Manual*. Windhagen, Germany: Wirtgen Group.