



REUTILIZAÇÃO DE MISTURAS BETUMINOSAS RECUPERADAS EM CAMADAS DE DESGASTE DE AUTOESTRADAS

CARINA INÊS MOREIRA VIEIRA

Julho de 2024

**REUTILIZAÇÃO DE MISTURAS BETUMINOSAS RECUPERADAS EM
CAMADAS DE DESGASTE DE AUTOESTRADAS**

REUSE OF RECLAIMED ASPHALT IN HIGHWAY WEARING COURSES

Carina Inês Moreira Vieira

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Geotécnica e Geoambiente**

Orientador: Professora Maria Manuela Martins de Carvalho (ISEP)

Co-orientador: Professor Henrique Manuel Borges Miranda (ISEL)

Júri

Presidente:

Helder Gil Iglésias de Oliveira Chaminé, Professor Coordenador com Agregação, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Vogais:

José Augusto Abreu Peixoto Fernandes, Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Maria Manuela Martins de Carvalho, Professora Adjunta, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Fátima Alexandra Barata Antunes Batista, Investigadora Auxiliar, Laboratório Nacional de Engenharia Civil

[página propositadamente em branco]

Resumo

A Brisa encetou vários projetos sob o tema pavimentos sustentáveis, no qual se enquadra o presente trabalho, e que se inserem no âmbito da estratégia de sustentabilidade e implementação do conceito de economia circular no seu setor da pavimentação. Na Brisa, a reutilização de misturas betuminosas recuperadas (RA) de pavimentos demolidos tem sido realizada, principalmente, através da substituição do material granular aplicado em camadas não ligadas dos pavimentos ou, em camadas betuminosas de base e ligação (até 15 %). Contudo, os trabalhos de manutenção dos pavimentos da rede Brisa ocorrem essencialmente na camada de desgaste (95 % da área intervencionada em 2023) o que limita a potencial utilização das misturas betuminosas recuperadas. Dentro deste contexto o presente estudo tem como objetivo principal avaliar a viabilidade e a influência da reutilização de 20 % de RA, proveniente de uma camada de desgaste em betão betuminoso drenante em fim de vida útil, numa nova camada de desgaste em betão betuminoso rugoso. Para se concretizar o objetivo definido foram estudadas onze misturas betuminosas do tipo AC 14 Surf (BBr), que na sua constituição utilizaram, duas RA de proveniência distinta (fração 8/16 mm), dois betumes modificados com polímeros (PMB) e dois aditivos rejuvenescedores distintos: (i) aditivo sólido com rejuvenescedor adicionado por via seca à mistura betuminosa e (ii) um aditivo rejuvenescedor incorporado no betume pelo respetivo fornecedor. O estudo considerou a avaliação do comportamento mecânico e funcional das misturas betuminosas, fabricadas em laboratório, aplicadas em trechos experimentais e em trechos piloto em autoestrada. Foi ainda efetuada a avaliação da influência dos aditivos no comportamento do betume extraído das misturas betuminosas. O estudo permitiu concluir que a reutilização de 20 % de RA numa mistura betuminosa com características de desgaste para autoestrada é exequível face à tecnologia de produção de misturas betuminosas disponível em Portugal, com comportamento mecânico e funcional equivalente a uma mistura betuminosa rugosa produzida apenas com materiais virgens.

Palavras-chave: Autoestradas, Pavimentos Sustentáveis, Misturas betuminosas recuperadas, Rejuvenescedores, Economia circular

[página propositadamente em branco]

Abstract

Brisa has initiated several sustainable paving projects, including this study, as part of its sustainability strategy and the implementation of the circular economy concept in the paving sector. At Brisa, the reuse of reclaimed asphalt (RA) from demolished road pavements was mainly done by replacing aggregates used in granular layers of road pavements or in bituminous base and binder courses (up to 15 %). However, maintenance work on the Brisa network's pavements takes place mainly in the wearing course (95 % of the area rehabilitated in 2023), which limits the potential use of reclaimed asphalt. With this in mind, the main objective of this study is to assess the feasibility and influence of reusing 20 % of the RA from an end-life porous asphalt used in the wearing course in a new gap-graded bituminous mixture used as a wearing course. In order to achieve the defined objective, eleven AC 14 Surf (BBr) bituminous mixtures were studied, containing in their composition two RA of different origin (fraction 8/16 mm), two polymer-modified bitumen's (PMB) and two different rejuvenating additives: (i) a solid additive with rejuvenating agent added to the bituminous mixture by the dry process and (ii) a rejuvenating additive added to the bitumen by the respective supplier. The study evaluated the mechanical and functional behaviour of bituminous mixtures produced in the laboratory and used in test sections and pilot sections on highways. It also evaluated the influence of additives on the behaviour of bitumen extracted from bituminous mixtures. The study concluded that the reuse of 20 % RA in a bituminous mixture with wear properties for highways is feasible given the technology available in Portugal for the production of bituminous mixtures, with a mechanical and functional behaviour equivalent to that of a gap-graded bituminous mixture produced only from virgin materials.

Keywords: Highways, Sustainable Pavements, Reclaimed Asphalt, Rejuvenators, Circular Economy

[página propositadamente em branco]

Agradecimentos

A presente dissertação é o culminar de uma fase académica que se iniciou em 2018 ao ingressar no curso de Engenharia Geotécnica e Geoambiente no ISEP. Foi um percurso de 6 anos, onde tive o privilégio de aprender com os melhores docentes, através das suas experiências e conhecimentos. A conclusão desta dissertação marca o fim de um percurso desafiante e enriquecedor, que não teria sido possível sem o apoio e o incentivo de várias pessoas e instituições. A todas elas, o meu sincero agradecimento.

Em primeiro lugar, gostaria de expressar o meu profundo agradecimento à Doutora Manuela Carvalho (ISEP), ao Doutor Henrique Miranda (ISEL) e à Engenheira Daniela Domingues (Brisa) pela orientação técnica e científica. Agradeço pelas várias reuniões e revisões do documento, bem como pela oportunidade de aprendizagem contínua. Estou grata por todas as sugestões, desafios, e pelo incentivo constante a fazer sempre mais e melhor. Um agradecimento especial à Brisa pela oportunidade de estágio, que foi fundamental para o meu ingresso no mercado de trabalho.

Estendo os meus agradecimentos a todos os docentes do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP, obrigada pela partilha de conhecimentos, competências e experiências, tanto em sala de aula como no laboratório ou no terreno.

Gostaria de agradecer a toda a equipa do Laboratório, da Brisa. Um especial agradecimento à Daniela Domingues e à Marta Gomes pela simpatia, disponibilidade e empatia, sem esquecer da restante equipa, principalmente ao André Trigais, ao Miguel Teixeira e ao Carlos Martins aos quais agradeço a receção e integração carinhosa, fazendo-me sentir sempre parte da equipa. À Sónia Santiago e restantes equipas da Brisa, com quem tive oportunidade de interagir, o meu obrigada por todas as experiências partilhadas e por sempre me terem incentivado a continuar este percurso, mesmo quando as situações eram mais desafiantes.

Um agradecimento muito especial aos meus Pais, pelo amor, compreensão e apoio incondicional ao longo destes anos, todos os conselhos, competências e valores que me transmitiram fizeram com que conseguisse terminar uma etapa tão importante na minha vida. Ao meu irmão, pelo constante apoio e encorajamento ao longo deste percurso. Ao Hugo, pela paciência, compreensão, companheirismo e por sempre me fazer acreditar que seria capaz.

Obrigado, aos meus colegas e amigos, especialmente à Diana Santos e ao Leandro Pinto, pelos momentos inesquecíveis que partilhamos ao longo desta jornada.

À restante família e amigos, o meu sincero agradecimento pelo apoio constante ao longo desta jornada.

[página propositadamente em branco]

Índice

1. Introdução	3
1.1. Enquadramento do tema	3
1.2. Objetivos.....	6
1.3. Metodologia	6
1.4. Estrutura do trabalho	7
2. Reutilização de misturas betuminosas recuperadas (RA) em camadas betuminosas	11
2.1. Economia circular na União Europeia	11
2.2. Economia circular nos pavimentos rodoviários	12
2.3. Desafios à reutilização.....	13
2.3.1. Qualidade e homogeneidade da RA.....	13
2.3.2. Centrais de produção de misturas betuminosas.....	14
2.3.3. Métodos de formulação de misturas betuminosas com reutilização de RA.....	15
2.3.4. Desempenho das misturas betuminosas com reutilização de RA.....	22
2.4. Utilização responsável e sustentável de RA	23
2.4.1. Reciclagem de misturas betuminosas de pavimentos a reabilitar	23
2.4.2. Adequado armazenamento dos diferentes materiais resultantes da reciclagem ...	24
2.5. Fabrico de misturas betuminosas com reutilização de RA.....	25
2.5.1. Centrais descontínuas	26
2.5.2. Centrais contínuas.....	29
2.5.3. Metodologias para adição de aditivos	32
2.6. Multi-reutilização de misturas betuminosas com RA	34
2.7. Contributo ambiental e económico da reutilização de RA.....	35
3. Caso de estudo	45
3.1. Programa experimental.....	45
3.2. Materiais constituintes das misturas betuminosas.....	60
3.3. Formulação das misturas betuminosas.....	68
3.4. Fabrico e aplicação nos trechos experimentais e piloto	72
4. Apresentação, análise e discussão de resultados do caso de estudo	79
4.1. Influência da RA e dos diferentes aditivos rejuvenescedores nas características dos betumes recuperados das misturas betuminosas	79
4.1.1. Penetração	80
4.1.2. Temperatura de amolecimento	81
4.1.3. Recuperação elástica.....	81
4.1.4. Força de ductilidade	82
4.1.5. Viscosidade.....	84
4.2. Avaliação do desempenho mecânico	87
4.2.1. Marshall.....	87
4.2.2. Sensibilidade à água	88
4.2.3. Resistência à deformação permanente.....	89
4.2.4. Resistência ao fendilhamento por fadiga.....	91
4.2.5. Módulo de deformabilidade	93
4.3. Avaliação do desempenho funcional das misturas betuminosas - Macrotextura	94
5. Conclusões e desenvolvimentos futuros.....	97
5.1. Considerações finais.....	97
5.2. Desenvolvimentos futuros	100
5.3. Outras atividades desenvolvidas no âmbito do estágio curricular	100
6. Referências bibliográficas.....	105
7. Anexos	113

[página propositadamente em branco]

Lista de figuras

Figura 1 - Potencial redução de emissões de CO ₂ e e de resíduos gerados na BCR.....	5
Figura 2 - Exemplo de processo de quantificação de aditivos amolecedores/rejuvenescedores seguindo uma abordagem simples (adaptado de EAPA 2018).	17
Figura 3 - Processo de quantificação de aditivos amolecedores/rejuvenescedores seguindo uma abordagem mais abrangente (adaptado de EAPA 2018).	18
Figura 4 - Formulação pelo método Marshall.	21
Figura 5 - Central de produção de misturas betuminosas descontínua com aquecimento da RA por contacto com os agregados quentes. (1)-Adição na balança dos agregados (2)-Adição direta no misturador (adaptado de PIARC, 2021).....	26
Figura 6 - Central de produção de misturas betuminosas descontínua com aquecimento da RA por contacto com os agregados quentes sem crivagem a quente. (1)-Adição à saída do tambor (2)-Adição no sistema de elevação dos agregados quentes (3)-Adição diretamente nos silos quentes (adaptado de PIARC, 2021).	27
Figura 7 - Central de produção de misturas betuminosas descontínua com aquecimento da RA juntamente com os agregados virgens. (1)-Adição da RA em anel de reciclagem (2)-Adição da RA no tambor-secador por sistemas alternativos (adaptado de PIARC, 2021).	28
Figura 8 - Central betuminosa descontínua com aquecimento da RA num tambor-secador paralelo. (1)-Adição na balança dos agregados (2)-Adição direta no misturador (adaptado de PIARC, 2021).	29
Figura 9 - Tambor de aquecimento, secagem e mistura de fluxo paralelo. Fonte: https://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/98042/06.cfm	30
Figura 10 - Tambor de aquecimento, secagem e mistura em contra fluxo. Fonte: https://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/98042/06.cfm	30
Figura 11 - Central de produção de misturas betuminosas contínua com tambor-secador paralelo (adaptado de PIARC, 2021).	32
Figura 12 - Aditivo adicionado em simultâneo com o betume (adaptado de Eskandarsefat, 2022).	32
Figura 13 - Aditivo incorporado no betume (adaptado de Eskandarsefat, 2022).....	33
Figura 14 - Aditivo adicionado sobre a RA na passadeira de transporte (adaptado de Eskandarsefat, 2022).	33
Figura 15 - Aditivo adicionado sobre a RA aquecida (adaptado de Eskandarsefat, 2022).....	33
Figura 16 - Fases de uma avaliação de ciclo de vida (ACV) (adaptado de Soares et al., 2023).....	36
Figura 17 - Componentes para um pavimento sustentável.	37
Figura 18 - Distribuição das emissões de CO ₂ e no processo de construção do pavimento (adaptado de Tarsi et al., 2020).	37
Figura 19 - Consumo de energia para diferentes percentagens de RA em diferentes cenários de desempenho (adaptado de Pouranian & Shishehbor, 2019).....	39
Figura 20 - Emissões de GEE para diferentes percentagens de RA em diferentes cenários de desempenho (adaptado de Pouranian & Shishehbor, 2019).....	40
Figura 21 - Programa Experimental.....	46
Figura 22 - Determinação da penetração com agulha. (1)-Penetrómetro (2)-Provete.....	49
Figura 23 – Determinação da temperatura de amolecimento, método do anel e bola. (1)-Equipamento automático (2)-Amostra no final do ensaio.	49
Figura 24 - Determinação da propriedade de tração de betumes modificados pelo método da força-ductilidade. (1)-Ductilímetro (2)-Moldagem do provete (3)-Provetes durante o ensaio.	50
Figura 25 - Determinação da recuperação elástica. (1)-Provetes antes do alongamento (2)-Provetes após o corte do fio do betume (3)-Medição da recuperação do fio do betume.	51

Figura 26 - Determinação da viscosidade dinâmica (<i>Brookfield</i>). (1)-Pesagem dos provetes para ensaio (2)-Viscosímetro rotacional.....	51
Figura 27 - Determinação da resistência ao envelhecimento sob a influência de temperatura e de um fluxo constante de ar, pelo método RTFOT. (1)-Pesagem dos provetes para ensaio (2)-Provetes na estufa/ ventilador tipo gaiola no início do ensaio (3)-Recipientes de vidro com provetes no fim do ensaio.....	52
Figura 28 - Localização geográfica dos trechos piloto.....	53
Figura 29 - Amostra após extração do betume solúvel em tetracloroetileno por centrifugação. ..	55
Figura 30 - Aspeto da granulometria por peneiração após extração do betume.....	55
Figura 31 - Baridade dos provetes. (1)-Pesagem do provete seco ao ar (2)-Provete húmido (3)-Pesagem do provete submerso em água.....	56
Figura 32 - Baridade máxima teórica dos provetes. (1)-início da aplicação de vácuo à amostra submetida a ensaio (2)-Picnómetro com amostra.....	56
Figura 33 - Ensaio Marshall. (1)-Provetes e estabilómetro no banho (2)-Prensa Marshall durante o ensaio.	57
Figura 34 - Sensibilidade à água. (1)-Prensa com dispositivo para tração indireta durante o ensaio (2)-Aspeto do tipo de rotura observada nos provetes secos após ensaio (3)-Aspeto do tipo de rotura observada nos provetes húmidos após ensaio.	57
Figura 35 - Resistência à deformação permanente (<i>Wheel-tracking</i>). (1)-Equipamento para o ensaio <i>Wheel-tracking</i> (2)-Provete durante o ensaio.	58
Figura 36 – Equipamento para avaliação da fadiga pelo método de ensaio de flexão a 4 pontos e módulo de deformabilidade. (1)-Provetes para ensaio (2)-Provete a ser ensaiado.....	58
Figura 37 - Realização do ensaio para determinação da profundidade média da macrotextura em obra.	59
Figura 38 - Evaporador rotativo. (1)-Equipamento para recuperação de betume em amostras de grande dimensão (2)-Equipamento para recuperação de betume em amostras de pequena dimensão.....	60
Figura 39 - Curvas granulométricas das frações de agregados, fíler e RA (M1.1, M1.2, M1.1-TE, M1.2-TE, M1.1-TP e M1.2-TP).....	62
Figura 40 - Curvas granulométricas das frações de agregados, fíler e RA utilizadas no estudo da (M2.2, M2.2-TE e M2.2-TP).....	64
Figura 41 - Energia de coesão (PMB 45/80-65 e PMB 45/80-65 Regener). (1)-Energia de coesão 5 °C (2)-Energia de coesão 10 °C (3)-Energia de coesão 15 °C.	67
Figura 42 - Fuso granulométrico e curvas granulométricas das misturas betuminosas de agregados utilizadas nas misturas betuminosas (M1-REF, M1.1 M1.2, M2-REF, e M2.2).	70
Figura 43 - Sequência, tempo e temperatura de mistura para as misturas betuminosas fabricadas em laboratório.	71
Figura 44 - Centrais de produção utilizadas para as misturas betuminosas.....	72
Figura 45 - Sequência, tempo e temperatura de mistura para as misturas betuminosas fabricadas em trechos experimentais e trechos piloto.	73
Figura 46 - Aplicação da mistura betuminosa nos trechos experimentais.	74
Figura 47 - Avaliação da macrotextura pelo método volumétrico.	74
Figura 48 - Aplicação nos trechos piloto. (1)-M1.1-TP e M1.2-TP (2)-M2.2-TP.	75
Figura 49 - Penetração dos betumes utilizados.	80
Figura 50 - Temperatura de amolecimento dos betumes utilizados.	81
Figura 51 - Recuperação elástica dos betumes utilizados.	82
Figura 52 - Força de ductilidade dos betumes recuperados das misturas betuminosas aplicadas em TE e TP. (1)-M1.1-TE e M1.1-TP (2)-M1.2-TE e M1.2-TP (3)-M2.2-TE e M2.2-TP.....	83
Figura 53 - Viscosidade dinâmica dos betumes recuperados das misturas betuminosas fabricadas em laboratório.	85
Figura 54 - Viscosidade dinâmica dos betumes recuperados das misturas betuminosas aplicadas em TE.....	86

Figura 55 - Viscosidade dinâmica dos betumes recuperados das misturas betuminosas aplicadas em TP.....	86
Figura 56 - Resumo dos resultados Marshall sobre misturas betuminosas produzidas em laboratório.....	87
Figura 57 - Resumo dos resultados Marshall sobre misturas betuminosas produzidas em central (trecho experimental e trecho piloto).....	87
Figura 58 - Resumo dos resultados sensibilidade à água (laboratório).	88
Figura 59 - Resumo dos resultados sensibilidade à água (trecho experimental e trecho piloto)....	89
Figura 60 - Resumo dos resultados resistência à deformação permanente nas misturas betuminosas fabricadas em laboratório.	90
Figura 61 - Resumo dos resultados resistência à deformação permanente nas misturas betuminosas fabricadas em central (trecho experimental).....	90
Figura 62 - Leis de fadiga das misturas betuminosas.....	92
Figura 63 - Evolução do módulo de deformabilidade para diferentes frequências.....	93
Figura 64 - Resumo dos resultados macrotextura (trecho piloto).	94
Figura 65 - Equipa do laboratório da Brisa.	102

[página propositadamente em branco]

Lista de tabelas

Tabela 1- Redução de custos nas matérias-primas virgens pela utilização de RA nos EUA (adaptado de Pouranian & Shishehbor, 2019).	38
Tabela 2 - Misturas betuminosas estudadas.....	46
Tabela 3 - Caracterização dos agregados, filler e RA.	47
Tabela 4 - Caracterização dos betumes virgens.....	48
Tabela 5 - Ensaio realizado para as misturas betuminosas.....	54
Tabela 6 - Ensaio realizado para o betume recuperado.	60
Tabela 7 - Granulometria das frações de agregados virgens e RA utilizados nas misturas betuminosas M1.1, M1.2, M1.1-TE, M1.2-TE, M1.1-TP e M1.2-TP.	62
Tabela 8 - Características dos agregados e da RA para o fabrico das misturas AC14 Surf (BBr) de acordo com as especificações CTE-Brisa, 2023 (M1.1, M1.2, M1.1-TE, M1.2-TE, M1.1-TP e M1.2-TP).....	63
Tabela 9 - Granulometria das frações de agregados, filler e RA utilizadas no estudo nas misturas M2.2, M2.2-TE e M2.2-TP.	64
Tabela 10 - Características dos agregados e da RA para o fabrico das misturas AC14 Surf (BBr) de acordo com as especificações CTE-Brisa, 2022 (M2.2, M2.2-TE e M2.2-TP).	65
Tabela 11 – Propriedades dos betumes utilizados.....	66
Tabela 12 - Características do aditivo rejuvenescedor (fibras).	68
Tabela 13 - Fuso e composições granulométricas das misturas de agregados definidas (M1-REF, M1.1 M1.2, M2-REF, e M2.2).	70
Tabela 14 - Fórmulas de trabalho utilizadas no laboratório.	71
Tabela 15 - Resultados dos ensaios da resistência ao fendilhamento por fadiga.....	91

[página propositadamente em branco]

Lista de acrónimos ou abreviaturas

4PB-PR	Ensaio de flexão em quatro pontos de amostras prismáticas (<i>Four point bending test</i>)
A3	Autoestrada Porto/Valença
A4	Autoestrada Porto/Amarante
AC	Betão betuminoso (<i>Asphalt Concrete</i>)
AC14	Betão betuminoso com agregado cuja dimensão máxima é igual a 14 mm
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BBd	Betão betuminoso drenante
BBr	Betão betuminoso rugoso
BBR	Reómetro de flexão de viga (<i>Bending Beam Rheometer</i>)
BS	<i>British standard</i>
CE	Comunidade Europeia
CO₂	Dióxido de Carbono
CO_{2e}	Dióxido de Carbono equivalente
CTE	Cláusulas Técnicas Especiais
CTE-Brisa	Cláusulas Técnicas Especiais da Brisa
D	Máxima dimensão do agregado
d	Menor dimensão do agregado
DIN	Instituto Alemão de Normalização
DSR	Reómetro de corte dinâmico (<i>Dynamic Shear Rheometer</i>)
EAPA	<i>European Asphalt Pavement Association</i>
EN 201	Estrada Nacional 201
EN	Norma Europeia
F	Deformação Marshall
f_i	Conteúdo de finos dos agregados grossos de valor i
G_{c_i/ii}	Granulometria dos agregados grossos de valor entre i e ii
GEE	Gases com Efeito de Estufa
Gf_i	Granulometria dos agregados finos de valor i
ISO	Organização Internacional de Normalização
ITS	Resistência à tração indireta
ITSR	Resistência conservada em tração indireta
ITS_s	Resistência à tração indireta dos provetes secos

ITS_w	Resistência à tração indireta dos provetes húmidos
JRS	JRS Retteinmaier
LA_i	Coefficiente de Los Angeles de valor i
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MB	Mistura betuminosa
MBaR	Misturas Betuminosas a Recuperar
MB_i	Valor de azul metileno de valor i
M_{DEi}	Coefficiente de micro-Deval de valor i
MP	Matérias-primas
N/S	Norte/Sul
NA	Não aplicável
NP	Norma Portuguesa
p	Inclinação da lei de fadiga
PA	<i>Porous asphalt</i>
PAV	<i>Pressure Aging Vessel</i>
PIARC	<i>Permanent International Association of Road Congresses World Road Association</i>
PIB	Produto Interno Bruto
PMB	<i>Polymer modified bitumen</i>
PSV	<i>Polished stone value</i>
Q	Quociente Marshall
RA	Misturas betuminosas recuperadas <i>Reclaimed Asphalt</i>
RD_{air}	Profundidade de rodeira média em ensaio de pista
REF	Referência
RTFOT	Rolling Thin Film Oven Test
S	Estabilidade Marshall
S/N	Sul/Norte
SAPA	<i>State Asphalt Pavement Association</i>
SE_i	Equivalente de areia de valor i
SSD	Provetes saturados com a superfície seca
Surf	Camada de desgaste
TE	Trecho experimental
TP	Trecho piloto
U	Máxima dimensão das partículas da mistura betuminosa recuperada
V_a	Porosidade
VCI	Via de Cintura Interna do Porto

VMA	Volume de vazios no agregado compactado
WA₂₄	Absorção de água
WTS_{air}	Taxa de deformação em ensaio de pista
ε₆	Extensão de tração para um milhão de aplicações de carga
ρ_a	Massa volúmica do material impermeável das partículas
ρ_b	Baridade dos provetes
ρ_{rd}	Massa volúmica das partículas secas em estufa
ρ_{ssd}	Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca

[página propositadamente em branco]

Capítulo I

Introdução

[página propositadamente em branco]

1. Introdução

1.1. Enquadramento do tema

Os pavimentos ao longo da sua vida útil, são sujeitos a um complexo processo de degradação função de múltiplos fatores (e.g. tráfego, condições climáticas, fundação) que individualmente e/ou em conjunto vão alterando as propriedades dos materiais que constituem o pavimento. Simultaneamente, as exigências relativas à segurança e conforto dos utilizadores impostas pelas autoridades reguladoras da mobilidade e dos transportes e/ou os níveis de serviço estabelecidos pelas concessionárias responsáveis pelas redes rodoviárias obrigam à realização de obras de beneficiação que geram quantidades significativas de resíduos com potencial para reutilização, em aplicação igual ou distinta da inicial de onde provêm (deve-se incrementalmente eliminar a utilização da designação de resíduos, adotando-se a designação de material alternativo e/ou subproduto).

Os Estados Unidos da América (EUA) reportaram em 2021 (EAPA, 2021), 91 milhões de toneladas de misturas betuminosas geradas na demolição dos pavimentos e/ou de misturas betuminosas provenientes de lotes rejeitados, de produções excedentárias ou com defeitos de produção. Do total de misturas betuminosas geradas, 99 % do material (misturas betuminosas recuperadas, RA) apresentou características para ser reutilizado na produção de novas misturas betuminosas e, dessa percentagem de material, 95 % foi efetivamente utilizado na produção de novas misturas

betuminosas, 4 % foram reciclados, ou seja, colocados em funções inferiores ou alternativas à da aplicação original e apenas 1 % foi depositado em aterro.

Na Europa (EU-27 incluindo a Islândia, Grã-Bretanha, Noruega, Sérvia, Suíça e Turquia) a produção de misturas betuminosas, em 2022, foi de 279,6 milhões de toneladas (EAPA, 2022). Dezanove destes países declararam que demoliram 31,5 milhões de toneladas de misturas betuminosas dos pavimentos e que 94 % desse material ficou disponível para ser reutilizado na produção de novas misturas betuminosas. Nestes países a percentagem de reutilização declarada em novas misturas betuminosas apresenta uma grande variabilidade com oscilações entre 19 % na Turquia e 100 % na Bélgica. Relativamente à quantidade de material reciclado para funções inferiores ou alternativas, as percentagens oscilaram entre os 0 % na Bélgica e em França e os 81 % na Turquia. Esta variabilidade contrasta com a prática utilizada nos EUA o que se traduz num impacto ambiental, económico e social significativamente negativo, decorrente da extração de novos materiais virgens e da deposição em vazadouro ou *downgrade* de materiais de elevada qualidade provenientes da demolição de pavimentos e consequente incremento das emissões de gases com efeito de estufa associadas a estas atividades. Segundo a World Road Association (PIARC), a redução de emissões de CO₂e corresponde aproximadamente a 0,027 toneladas por cada tonelada de RA reutilizada (PIARC, 2022). Somente na Europa a reutilização das 31,5 milhões de toneladas de misturas betuminosas demolidas corresponderia uma redução de cerca de 850 mil toneladas de emissões CO₂e.

Em Portugal, a realidade não é distinta dos restantes países da Europa, os dados reportados à European Asphalt Pavement Association (EAPA) relativos à produção de misturas betuminosas em 2022 apontam para cerca de 3,1 milhões de toneladas (EAPA, 2022a), não sendo indicados dados relativos às quantidades demolidas dos pavimentos, com potencial de reutilização ou de reciclagem em funções inferiores ou alternativas.

No âmbito da Brisa Concessão Rodoviária (BCR), que corresponde à concessão principal da Brisa Autoestradas com uma extensão de 1124 km (num total de 1549 km), foram aplicadas em 2023 aproximadamente 120 mil toneladas de novas misturas betuminosas, após a demolição por fresagem de aproximadamente 105 mil toneladas, das quais, cerca de 70 % correspondem à demolição de camadas de desgaste, sendo o restante proveniente de camadas de ligação e base. O âmbito das intervenções realizadas consistiu essencialmente na beneficiação de camadas de desgaste correspondente a 95 %, e 5 % em intervenções ao nível das camadas de ligação e base.

Para a realidade da BCR e considerando uma reutilização de somente 20 % de material recuperado dos pavimentos demolidos em 2023, haveria uma potencial redução de emissões de CO₂e de

aproximadamente 570 toneladas, o equivalente a cerca de 23 mil viagens de automóvel, Lisboa-Porto. Na Figura 1 é apresentada para a BCR a potencial redução de emissões de CO₂e e de resíduos gerados, em função da percentagem de reutilização de RA.

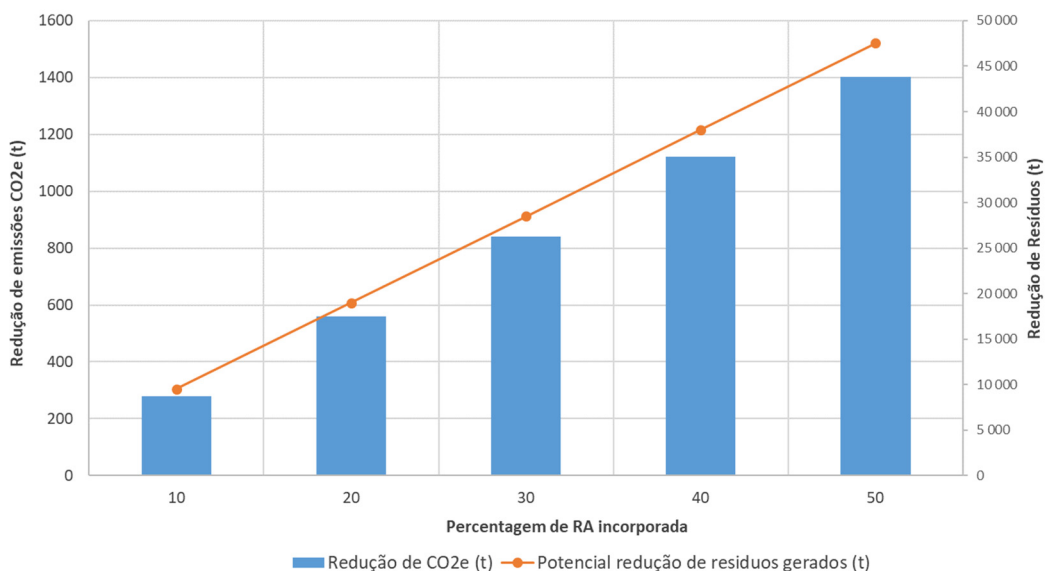


Figura 1 - Potencial redução de emissões de CO₂e e de resíduos gerados na BCR.

Na Figura 1 é possível observar que um incremento na reutilização de RA se traduz numa redução significativa de emissões de CO₂e e de resíduos gerados nas empreitadas de beneficiação de pavimentos da BCR. Seria, portanto, espectável o interesse na reutilização de maiores percentagens de RA, como seja 100 %. Contudo, esse interesse colide, nomeadamente, com as limitações tecnológicas nas centrais de produção de misturas betuminosas existentes em Portugal, que limitam maioritariamente a reutilização de RA a 20 %.

Porém, a reutilização de RA proveniente de camadas demolidas em novas misturas betuminosas, destaca-se como uma solução que maximiza o ciclo de vida dos materiais, assim como, contribui para a economia circular e concretização dos objetivos da Brisa, de reduzir progressivamente as emissões de gases com efeito de estufa (GEE) e geração de resíduos no âmbito da sua atividade de pavimentação (Brisa, 2022).

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) são a prioridade da estratégia de sustentabilidade da Brisa, juntamente com a descarbonização. Com base numa análise e avaliação interna cruzada com o mapeamento de partes interessadas e análise de materialidade, a Brisa isolou onze ODS que têm uma maior relação com os benefícios, os impactos e as perspetivas do negócio.

O presente estudo enquadra-se no âmbito do ODS 12 - Produção e Consumo Sustentáveis, no qual a Brisa pretende implementar a economia circular a 100 % nas compras e fornecimentos até 2030. Para alcançar este objetivo, a Brisa tem em curso o desenvolvimento de vários estudos e soluções que visam contribuir para a economia circular dos seus processos onde se destaca o estudo sobre pavimentos sustentáveis (Brisa, 2022). Um dos estudos em curso enquadra o âmbito desta dissertação através do qual, a Brisa pretende implementar de forma sistemática a reutilização das misturas betuminosas provenientes da demolição das camadas de desgaste, integrando-as como material constituinte de uma nova mistura betuminosa, reduzindo a exploração de novos recursos naturais, as emissões de GEE e a quantidade de resíduos gerados (Brisa, 2022).

1.2. Objetivos

Com a finalidade de contribuir para a implementação de práticas mais sustentáveis, alinhadas com a utilização responsável de recursos e a redução do impacto ambiental do setor da pavimentação, o presente estudo tem como objetivos principais:

1. Avaliar em laboratório, em trechos experimentais e piloto, a viabilidade da reutilização de 20 % de RA proveniente de uma camada de desgaste em fim de vida útil, numa nova mistura betuminosa a aplicar como camada de desgaste para autoestradas;
2. Estudar a influência da utilização de RA e dos aditivos rejuvenescedores no comportamento dos betumes;
3. Estudar a influência da utilização de RA e dos aditivos rejuvenescedores no comportamento mecânico e funcional das misturas betuminosas.

1.3. Metodologia

A metodologia utilizada, para se atingirem os objetivos propostos, foi a seguinte:

1. Pesquisa bibliográfica;
2. Sistematização dos procedimentos para fabrico e aplicação das misturas betuminosas com RA;
3. Seleção e caracterização laboratorial da RA proveniente das camadas de desgaste no que se refere à análise granulométrica, percentagem de betume envelhecido e respetivas características;

4. Seleção dos aditivos para rejuvenescer o betume envelhecido presente na RA;
5. Caracterização dos betumes no que concerne à penetração, temperatura de amolecimento (ambas as propriedades com e sem envelhecimento), à recuperação elástica, força de ductilidade e viscosidade;
6. Caracterização das misturas betuminosas (com e sem RA) relativamente ao seu comportamento mecânico e funcional para diferentes fases de fabrico (laboratório e central);
7. Acompanhamento do fabrico das misturas betuminosas em central e sua aplicação em trechos experimentais e piloto.

1.4. Estrutura do trabalho

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos, cuja organização e conteúdo se sintetizam neste capítulo.

O primeiro capítulo “Introdução” aborda o tema do presente estudo e sua importância. São, igualmente, apresentados os objetivos, a metodologia e a estrutura do trabalho.

O segundo capítulo “Reutilização de misturas betuminosas recuperadas (RA) em camadas betuminosas” é dedicado à apresentação do estado da arte, com enfoque nos desafios da reutilização de RA e o seu contributo ambiental e económico.

No terceiro capítulo “Caso de estudo”, é apresentado o programa experimental, os materiais constituintes utilizados na formulação das misturas betuminosas em laboratório e sua aplicação em trechos experimentais e piloto.

No quarto capítulo “Apresentação, análise e discussão de resultados do caso de estudo” é abordada a influência da RA e dos aditivos rejuvenescedores nas características dos betumes recuperados das misturas betuminosas e no desempenho mecânico e funcional das misturas betuminosas.

No quinto capítulo “Considerações finais e desenvolvimentos futuros” são apresentadas as principais conclusões do trabalho, bem como os desenvolvimentos futuros no âmbito da reutilização de RA em misturas betuminosas, complementando com outras atividades desenvolvidas no âmbito do estágio curricular realizado.

[página propositadamente em branco]

Capítulo II

Reutilização de misturas betuminosas recuperadas (RA) em camadas betuminosas

[página propositadamente em branco]

2.Reutilização de misturas betuminosas recuperadas (RA) em camadas betuminosas

2.1. Economia circular na União Europeia

Em 2020 foi publicado pela Comissão Europeia o novo plano de ação para a Economia Circular, (European Union, 2021). Neste plano para cumprir as ambições ambientais listadas no Pacto Ecológico Europeu (European Commission, 2021), a Europa precisa de acelerar para um modelo de crescimento regenerativo que devolva mais ao planeta do que o que retira. Por forma a manter o consumo dentro dos limites da capacidade do planeta é necessário que na década 2020-2030 a Europa se esforce para reduzir a sua pegada de consumo e duplique a sua taxa de utilização de materiais circulares. De acordo com este plano esta transição progressiva, mas irreversível para um sistema de economia circular é uma parte indispensável da estratégia industrial da União Europeia (UE). De acordo com (European Commission, 2018) a aplicação dos princípios de economia circular em toda a economia da UE tem potencial para aumentar o PIB da UE em mais de 0,5% até 2030, criando cerca de 700 000 novos empregos.

O impacto deste plano no setor da construção é extremamente relevante uma vez que este setor é responsável por cerca de 50 % de todo o material extraído e por mais de 35 % da geração de resíduos na UE.

Adicionalmente, estima-se que 5 % a 12 % do total de emissões de GEE na UE são provenientes da extração de materiais, do fabrico de produtos de construção, e da construção/beneficiação. Uma utilização mais eficiente dos materiais poderia conduzir à redução destas emissões em cerca de 80 % (Hertwich et al., 2020).

2.2. Economia circular nos pavimentos rodoviários

O principal impacte ambiental durante a vida útil de uma rodovia são as emissões de GEE dos veículos que nela circulam, correspondendo a construção e a beneficiação apenas entre 1 % a 2 % do total de emissões para um período de dimensionamento de 30 anos (Brisa, 2022). No entanto, o impacte de uma rodovia inclui também a exploração de recursos naturais e a produção de resíduos que conflituam com os princípios da economia circular, os quais não podem ser ignorados. Além disso, a gestão e a eliminação de resíduos seguem regulamentos europeus tais como a diretiva 2018/851 transposta a nível nacional pelo Decreto-Lei n.º 102-D/2020 que definem uma hierarquia para o tratamento de resíduos com a seguinte ordem: (1) prevenção e reparação; (2) preparação para reutilização; (3) reciclagem; (4) outros tipos de valorização e (5) eliminação.

No seguimento dos diversos planos/regulamentos/diretivas, uma estratégia mais sustentável de gestão de ativos da infraestrutura rodoviária, passa sempre por prolongar a sua vida útil preservando o pavimento o máximo de tempo possível e reduzindo assim a necessidade de proceder à sua demolição. Se uma rodovia for adequadamente projetada, construída e gerida e com isso durar o dobro do tempo (vida útil), então 100 % dos materiais virgens que teriam sido necessários para a sua reconstrução terão sido preservados.

A opção mais sustentável na gestão dos pavimentos rodoviários passa sempre por prolongar a sua vida útil, no entanto quando alcançado o fim da sua vida, por incapacidade estrutural ou funcional (totalidade do pavimento/camadas específicas), é necessário proceder à sua demolição e substituição por novos materiais. Neste processo são geradas grandes quantidades de resíduos e consumidas consideráveis quantidades de novos materiais virgens. Torna-se premente pelo facto de os recursos utilizados não serem infindáveis minimizar a utilização de materiais virgens e valorizar a reutilização dos materiais provenientes da própria obra, promovendo a circularidade no processo de beneficiação de pavimentos rodoviários.

2.3. Desafios à reutilização

O material proveniente das camadas demolidas (misturas betuminosas a recuperar, MBaR), em geral, não é adequado para ser reutilizado imediatamente, exigindo algum processamento intermédio. A EN 13108-8, estabelece requisitos para as misturas betuminosas recuperadas (RA) no que respeita às propriedades do ligante, dos agregados assim como das matérias estranhas aplicáveis em todos os tipos de utilização de RA. A norma europeia indica também quais as propriedades da RA e dos seus materiais constituintes que necessitam de ser declaradas e devidamente documentadas para uma adequada descrição do stock de RA. Esta norma vem assim uniformizar a informação relativa à RA facilitando a utilização deste material por todas as partes interessadas.

Todavia, a indústria da produção de misturas betuminosas debate-se ainda com alguns problemas práticos que dificultam a utilização sistemática de RA na produção de misturas betuminosas e o incremento da percentagem de reutilização.

Segundo Williams et al. (2018) apesar das vantagens ambientais da utilização de RA na construção de novos pavimentos há ainda obstáculos que limitam a sua utilização de forma generalizada tais como: 38,5 % limites estabelecidos por especificações, 18,5 % disponibilidade de RA, 15,4 % capacidade das centrais de produção das misturas betuminosas, 13,8 % requisitos volumétricos das misturas betuminosas e 6,2 % devido ao desempenho das misturas betuminosas (Pouranian & Shishehbor, 2019).

2.3.1. Qualidade e homogeneidade da RA

Usualmente, os materiais provenientes da demolição dos pavimentos contêm elevadas percentagens de partículas finas, como resultado das operações de fresagem das camadas betuminosas, ou ainda resultante do processo de britagem para redução da dimensão das partículas, principalmente quando a demolição dos pavimentos abrange várias camadas. A quantidade de partículas finas existente na RA é normalmente uma limitação à reutilização de elevadas percentagens nas misturas betuminosas, pelos requisitos referentes à granulometria no fabrico de novas misturas betuminosas. Além disso, as partículas finas contêm a maior quantidade de betume envelhecido devido à sua elevada superfície específica. Estas partículas finas são também as mais suscetíveis a reter um maior teor em água durante o armazenamento, o que é particularmente relevante em especial durante a fase de fabrico, dado que a RA não drena a água tão facilmente como os agregados virgens (Tarsi et al., 2020), o que implica um maior consumo energético para aquecer a RA e os agregados virgens (ver 2.3.2).

Algumas medidas a adotar para aumentar a qualidade e homogeneidade da RA são:

- Efetuar a fresagem de cada camada do pavimento de forma individualizada e de proveniência conhecida e referenciada;
- Efetuar uma boa operação de fresagem que produza uma mistura betuminosa a recuperar de elevada qualidade. A qualidade da MBaR está muito dependente do equipamento de fresagem utilizado, da velocidade de fresagem e da profundidade de fresagem. Uma boa operação de fresagem garante uma elevada qualidade da mistura betuminosa a recuperar;
- A execução de stocks de MBaR separados por proveniência (obra/projeto), tipo de camada sem contaminações das diferentes camadas aumenta significativamente a homogeneidade e a qualidade da RA proveniente deste material.

A produção das RA pode envolver uma ou mais operações nomeadamente: (i) verificação da existência de matérias estranhas; (ii) britagem; (iii) crivagem e (iv) separação em frações, de modo, a produzir RA que cumpra os requisitos especificados para a produção das misturas betuminosas (Tarsi et al., 2020). Quanto maior a necessidade de processamento da MBaR, maior será o custo associado à reutilização da RA, pelo que os cuidados referidos a ter no processo de demolição poderão minimizar a necessidade de processamento adicional e conseqüentemente os custos associados.

2.3.2. Centrais de produção de misturas betuminosas

A implementação do processo de reciclagem em central implica uma série de adaptações tendo como intuito a reutilização de RA. A indústria tem vindo a investir no desenvolvimento das centrais tradicionais (contínuas ou descontínuas), equipando-as com novos componentes que permitem a produção de misturas betuminosas recuperadas de forma mais sustentável.

- **Centrais descontínuas**

Nas centrais descontínuas existem duas possibilidades para adição da RA: diretamente no misturador, sendo o aquecimento e secagem do material realizado através do contacto com os agregados virgens sobreaquecidos, neste caso as percentagens de reutilização variam entre os 10 % e os 30 %; ou quando as centrais estão equipadas com um segundo tambor-secador destinado ao aquecimento da RA, a percentagem de reutilização é maior podendo atingir os 70 % (LNEC E 472, 2009).

- **Centrais contínuas**

As centrais contínuas deverão dispor de um sistema alimentador que permita a introdução da RA numa zona do tambor-secador misturador protegida da chama do queimador, o aquecimento e a secagem do material é neste caso realizado pelos gases de combustão quentes e pelo contacto com os agregados virgens sobreaquecidos. Consoante o tipo de secador misturador da central e equipamentos disponíveis, as percentagens de reutilização poderão variar entre os 10 % e os 50 %.

2.3.3. Métodos de formulação de misturas betuminosas com reutilização de RA

A utilização de métodos de formulação de misturas betuminosas tem como objetivo determinar a combinação de agregados e betume, de tal modo que se obtenha uma mistura betuminosa com as características pretendidas e/ou previstas nas condições contratuais.

A reutilização de RA veio introduzir alguns desafios à formulação de misturas betuminosas, nomeadamente, na compatibilização do betume envelhecido presente na RA com o betume virgem adicionado, uma vez que as características reológicas destes dois materiais são muito distintas e influenciam o desempenho final da mistura betuminosa. A reutilização até 20% de RA proveniente de misturas betuminosas com betumes de pavimentação tem sido realizada com êxito pela indústria, no entanto nos últimos anos tem sido necessário reutilizar cada vez mais misturas betuminosas provenientes de camadas de desgaste que contêm na sua composição betumes modificados com polímeros. O betume recuperado destas misturas betuminosas apresenta características bastante distintas dos betumes recuperados de misturas betuminosas que utilizaram betumes convencionais, nomeadamente, no endurecimento e oxidação, colocando em causa as tecnologias de reutilização normalmente utilizadas para as misturas com betumes convencionais. Neste contexto a indústria identificou a necessidade de desenvolver novas tecnologias para fazer face às necessidades e requisitos técnicos de utilização de RA com betumes modificados. Aditivos, tais como, amolecedores e rejuvenescedores vieram dar resposta às necessidades identificadas pela indústria para lidar com estes novos materiais (EAPA, 2018).

Os aditivos amolecedores potenciam a redução da viscosidade e da temperatura de amolecimento do betume envelhecido, este efeito permite que o betume final da mistura betuminosa produzida com adição de RA apresente um valor de penetração em conformidade com o especificado para a mistura betuminosa. No entanto não é consensual (EAPA, 2018) a durabilidade dos efeitos produzidos por este tipo de aditivos, uma vez que a modificação introduzida no betume é limitada às propriedades físicas e reológicas deste material. Nesta categoria estão incluídos óleos e ceras provenientes de diversas origens.

Os aditivos rejuvenescedores contêm habitualmente uma elevada percentagem de maltenos (Road Surface Technology, 2020), possibilitando à semelhança dos aditivos amolecedores que as características físicas (viscosidade e temperatura de amolecimento) e reológicas do betume envelhecido sejam alteradas e complementarmente que parte das propriedades químicas do betume original sejam recuperadas, contribuindo posteriormente para um incremento do desempenho da mistura betuminosa com reutilização de RA. Este contributo conduz a que atualmente sejam utilizados rejuvenescedores em detrimento dos amolecedores.

Uma das fases fundamentais da formulação de uma mistura betuminosa com RA é a determinação do tipo e quantidade de aditivo amolecedor/rejuvenescedor a utilizar, em geral, podem ser utilizados vários critérios para efetuar a seleção, com o intuito de garantir misturas betuminosas com um comportamento/desempenho/durabilidade adequado.

A seleção do aditivo amolecedor/rejuvenescedor pode basear-se apenas em ensaios para caracterização dos betumes, ou conjuntamente com ensaios para caracterização do comportamento mecânico das misturas betuminosas:

- **No caso de se basear apenas em ensaios para caracterização do betume**

Como mencionado na norma EN 13108 para misturas betuminosas, onde a RA pode ser reutilizada, o valor de penetração e a temperatura de ponto de amolecimento do betume na mistura resultante devem cumprir os requisitos da norma para a mistura betuminosa a produzir. A seleção da quantidade e tipo de rejuvenescedor deve ser realizada, de forma que no mínimo se cumpram os requisitos de valor de penetração e/ou temperatura de ponto de amolecimento, estabelecidos para a mistura betuminosa a produzir. Podem, no entanto, serem definidos requisitos de desempenho finais para a mistura betuminosa que poderão implicar na definição do tipo e quantidade de rejuvenescedor a utilizar. A avaliação do efeito do amolecedor/rejuvenescedor, tem como objetivos conferir flexibilidade ao betume da RA (perdida no envelhecimento) e garantir a consistência pretendida para temperaturas elevadas (garantindo a resistência à deformação permanente). Assim, a determinação da dosagem de aditivo rejuvenescedor inicia-se pela quantificação do aditivo necessário para repor o valor de penetração pretendido para o betume (com a percentagem de betume envelhecido que irá incorporar a nova mistura) após a qual se avalia a temperatura de amolecimento.

Na Figura 2 é apresentado um exemplo da influência da quantidade de um determinado amolecedor/rejuvenescedor na penetração e temperatura de amolecimento.

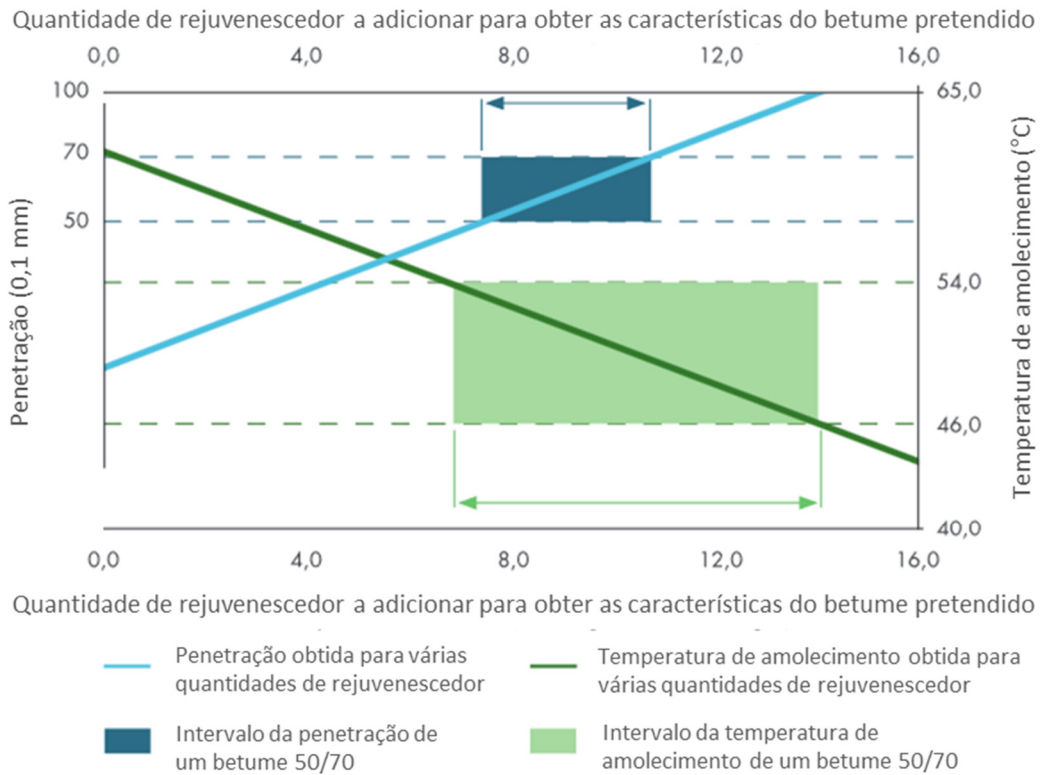


Figura 2 - Exemplo de processo de quantificação de aditivos amolecedores/rejuvenecedores seguindo uma abordagem simples (adaptado de EAPA 2018).

A Figura 2 apresenta a gama de dosagens de aditivo em que o betume rejuvenescido cumpre os critérios de um betume de pavimentação com classificação 50/70. A dosagem ótima difere dependendo da propriedade selecionada. Deste modo, é importante selecionar o intervalo em que a quantidade de aditivo permitirá cumprir os requisitos estabelecidos para os ligantes betuminosos na EN 12591 após o rejuvenescimento.

Após efetuada a abordagem simples de quantificação do aditivo amolecedor/rejuvenecedor, pode ser necessário efetuar uma abordagem mais abrangente podendo ser realizados ensaios adicionais. Nesta abordagem são avaliados parâmetros reológicos do betume virgem antes e depois de submetido a envelhecimento de curto e longo prazo, seguindo o fluxograma apresentado na Figura 3.

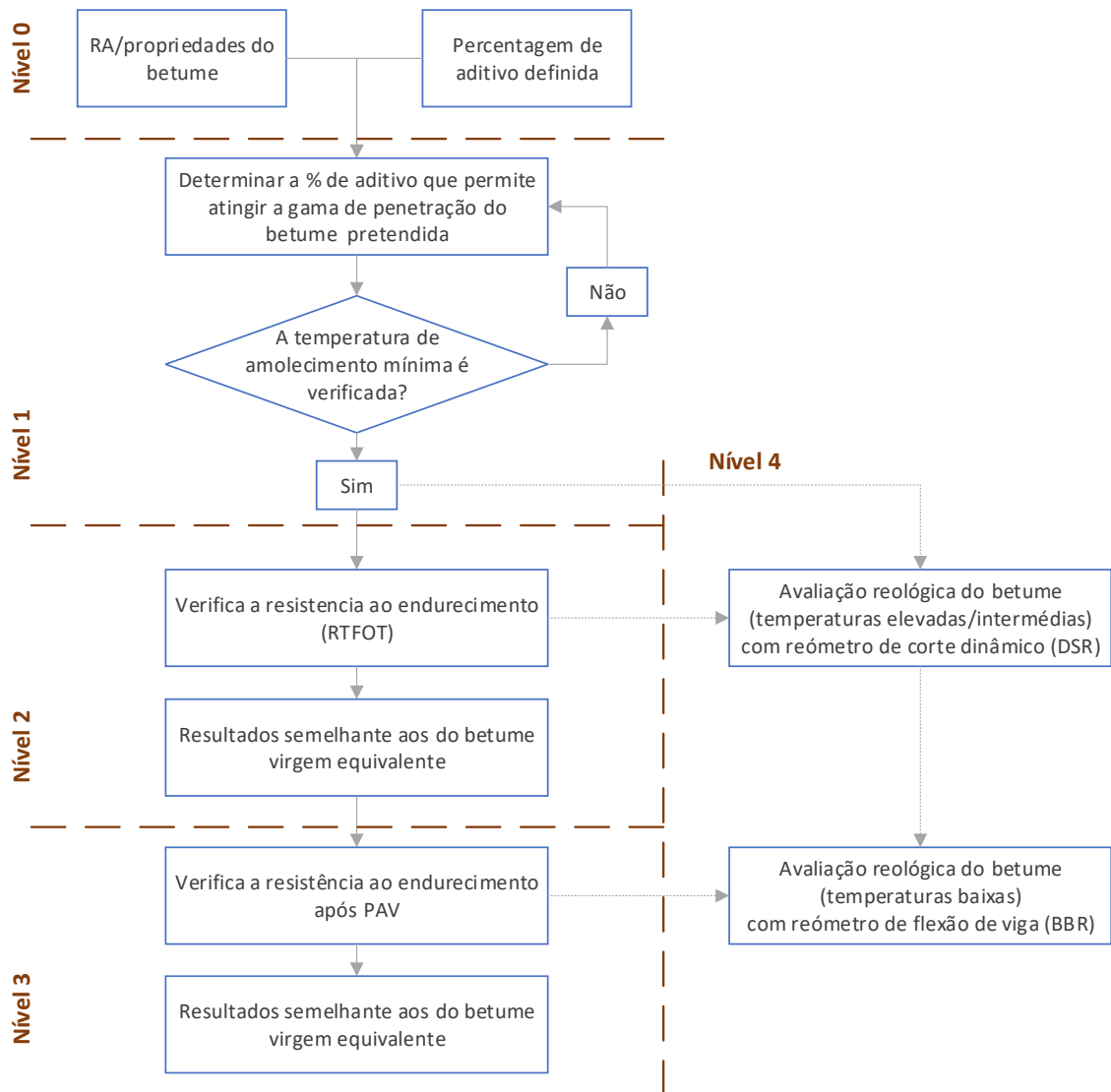


Figura 3 - Processo de quantificação de aditivos amolecedores/rejuvenescedores seguindo uma abordagem mais abrangente (adaptado de EAPA 2018).

De acordo com a Figura 3 a seleção do aditivo deve ser realizada por forma a que, a mistura de betume envelhecido com betume virgem apresente propriedades semelhantes às especificadas em fase de projeto para o betume a utilizar na mistura betuminosa com RA. Neste caso a quantidade e eficiência dos aditivos a utilizar pode basear-se na variação dos resultados da consistência do betume com base nos valores de:

- Penetração a 25 °C;
- Temperatura de amolecimento;
- Viscosidade (*Brookfield*).

Podem ainda ser avaliadas outras propriedades através dos ensaios de:

- Resistência ao envelhecimento a curto prazo (RTFOT, *Rolling Thin Film Oven Test*);
 - Reómetro de flexão de viga (BBR, *Bending Beam Rheometer*) para avaliação das propriedades do betume a baixas temperaturas de serviço após envelhecimento a longo prazo utilizando uma câmara de envelhecimento sob pressão (PAV, *Pressure Aging Vessel*);
 - Reómetro de corte dinâmico (DSR, *Dynamic Shear Rheometer*), para avaliação das propriedades reológicas a temperaturas de serviço intermédias e altas;
 - Ponto de inflamação do betume.
- **Caraterização mecânica das misturas betuminosas com reutilização de RA e aditivo rejuvenescedor**

Em Portugal o método de formulação de misturas betuminosas mais generalizado é o método empírico, com base no método Marshall (norma ASTM D 1559), introduzido em Portugal no princípio dos anos 50 e ainda utilizado (Branco et al., 2006). Com a obrigatoriedade de marcação CE das misturas betuminosas além das características determinadas pelo método Marshall, a formulação da mistura betuminosa passou a incluir a respetiva avaliação da sensibilidade à água (EN 12697-12) e da resistência à deformação permanente (EN 12697-22), dependendo da camada do pavimento onde vai ser aplicada.

Contudo, atualmente a reutilização de RA com ou sem adição de amolecedores/ rejuvenescedores, conduz a novos desafios, tornando premente a avaliação de outras propriedades, como seja a avaliação da resistência ao fendilhamento por fadiga (EN 12697-24) e do módulo de deformabilidade (EN 12697-26), como contributo para se assegurar de forma responsável o adequado desempenho e durabilidade das misturas betuminosas com RA.

Assim importa compreender os vários passos habitualmente realizados na formulação das misturas betuminosas segundo o método Marshall, para uma adequada formulação. Antes do estudo de composição, obter um material granular cuja curva granulométrica e restantes características se enquadrem dentro do fuso especificado pelos cadernos de encargos/ projetos de execução e restantes requisitos de qualidade especificados. Para obter o material pretendido há necessidade de misturar várias frações de agregados, finos e grosso, produzindo um material que respeite as especificações aplicáveis à mistura betuminosa que se pretende fabricar em cada caso (Branco et al., 2006).

Selecionadas as frações granulométricas a utilizar em cada mistura betuminosa, (Anexo 1) são apresentadas as frações granulométricas habitualmente utilizadas para formular os tipos de mistura betuminosas comumente utilizadas em Portugal), deve ser determinada a percentagem de cada fração, de modo a obter a curva granulométrica pretendida. Com a curva granulométrica do agregado escolhido pode iniciar-se o estudo Marshall (Branco et al., 2006).

O método Marshall aplica-se a misturas betuminosas a quente, densas ou abertas, desde que a dimensão máxima do agregado não seja superior a 25 mm, misturas betuminosas abrangidas pelas normas de produto, NP EN 13108-1, NP EN 13108-5 e NP EN 13108-7 (Branco et al., 2006).

Para a realização do estudo Marshall produzem-se cinco conjuntos de provetes fabricados com misturas (EN 12697-35) onde se fez variar a percentagem de betume em 0,5 % relativamente à massa total. Deve procurar-se que dois conjuntos apresentem percentagens em betume acima da percentagem ótima e que pelo menos dois dos restantes conjuntos apresentem valores abaixo dessa percentagem ótima. O método consiste na determinação, a partir de ensaios realizados sobre a mistura betuminosa solta e sobre provetes compactados, de várias grandezas que caracterizam a mistura betuminosa estudada. As principais são:

- Baridade aparente, ρ_b (EN 12697-6);
- Estabilidade, S (EN 12697-34);
- Porosidade, V_a (EN 12697-8);
- Deformação, F (EN 12697-34) e;
- Volume de vazios no agregado compactado, VMA (EN 12697-8).

O valor de cada uma destas grandezas é calculado fazendo a média dos valores obtidos em cada um dos três (mínimo) provetes ensaiados para cada percentagem de betume. Na Figura 4 estão representados graficamente a variação das características de uma mistura betuminosa com a percentagem de betume.

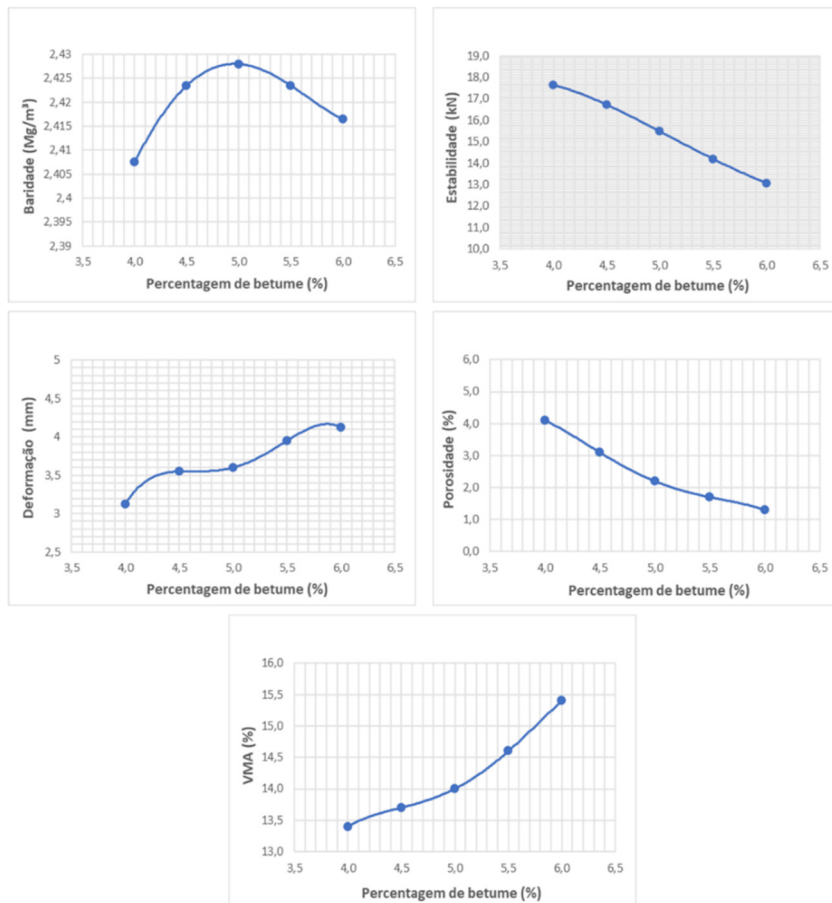


Figura 4 - Formulação pelo método Marshall.

A percentagem ótima de betume para a mistura betuminosa a desenvolver será a média das percentagens correspondentes à máxima estabilidade, à máxima baridade e ao valor médio dos limites estabelecidos nas especificações que a mistura betuminosa terá de cumprir (cadernos de encargos, norma de produto ou outros definidos) relativos à porosidade. O valor encontrado deverá corresponder a um valor de deformação e de VMA que esteja enquadrado nos limites impostos nas especificações a cumprir (Branco et al., 2006).

Após a determinação do teor ótimo pelo método de Marshall serão fabricados provetes para a avaliação da suscetibilidade da mistura betuminosa à água e à deformação permanente se aplicável. Os resultados desta avaliação devem estar enquadrados nos limites impostos nas especificações a cumprir, caso contrário terá de ser formulada nova composição.

A formulação de misturas betuminosas com reutilização de RA segue o mesmo método do anteriormente descrito para as misturas betuminosas, com algumas alterações dependentes da taxa de reutilização de RA, da percentagem de betume da RA e das características do betume presente na RA, nomeadamente, penetração e temperatura de amolecimento.

As misturas betuminosas recuperadas a utilizar no fabrico de novas misturas betuminosas devem ser identificadas e classificadas de acordo com a EN 13108-8, através da dimensão máxima das partículas do material e da dimensão do agregado nele contido $U_{RA} d/D$, em que U é a máxima dimensão das partículas da mistura betuminosa recuperada, em que D é a máxima dimensão do agregado presente na RA e d a menor dimensão normalmente nas misturas betuminosas recuperadas será quase sempre zero. Após a verificação da aptidão da RA, proveniente de uma utilização específica (e.g. camada de desgaste ou de camada de ligação) com propriedades específicas (e.g. PSV, tipo e forma do agregado, etc.), ou proveniente de um *stock* que é provisionado de forma a garantir a regularidade de determinados requisitos previamente definidos de acordo com a EN 13108-8, ou pelas especificações técnicas da mistura betuminosa final, deve ser avaliado o impacto da percentagem a reutilizar na curva granulométrica da mistura betuminosa que se pretende fabricar. Esta avaliação deve ser feita no material após extração de betume e efetuado o ajuste necessário nas restantes frações de agregados virgens.

Dependendo da percentagem de reutilização da RA, do conteúdo de betume presente na RA e das características que este betume apresente deve seleccionar-se o tipo de betume virgem e eventuais aditivos a adicionar à mistura para que em conjunto com o betume envelhecido presente na mistura betuminosa recuperada, se obtenha um betume final com as características pretendidas. Para o efeito, pode recorrer-se a fórmulas e gráficos (como apresentado anteriormente na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**) que permitem estimar as características do ligante da mistura betuminosa final a partir das características dos betumes utilizados do seu fabrico, em função da sua proporção no betume final. Na norma EN13108-1 (Anexo A) e na EN 13108-7 (Anexo A) estão disponíveis algumas destas relações (LNEC E 472, 2009). Se o betume presente nas misturas betuminosas recuperadas se encontrar muito envelhecido, e se a taxa de reutilização o justificar, dever-se-á considerar a hipótese de utilizar aditivos preferencialmente rejuvenescedores.

Após a determinação da percentagem de RA e do betume virgem a utilizar na mistura betuminosa realiza-se de igual forma o estudo Marshall conforme descrito anteriormente, a avaliação das restantes características e a verificação do enquadramento com as especificações a cumprir.

2.3.4. Desempenho das misturas betuminosas com reutilização de RA

Apesar de limitada, observa-se uma crescente utilização de misturas betuminosas com reutilização de RA, o que representa um avanço significativo em direção à sustentabilidade na construção e beneficiação de pavimentos rodoviários. No entanto, esta prática não está isenta de desafios relevantes que precisam ser abordados para garantir o adequado desempenho das misturas betuminosas.

Um dos principais desafios consiste na variabilidade das propriedades da RA, que pode afetar diretamente o desempenho das misturas betuminosas com RA. A composição e as características da RA podem variar consideravelmente dependendo de fatores como a fonte do material, o processo de reciclagem e o estado de degradação do pavimento original. Esta variabilidade pode levar a mudanças imprevisíveis no comportamento mecânico das misturas betuminosas, afetando a sua resistência à fadiga, deformação permanente e adesão entre os agregados e o novo betume adicionado (Senior-Arrieta & Graciano, 2021).

Outro desafio significativo está relacionado com a presença de contaminantes e materiais estranhos na RA, que podem comprometer a qualidade das misturas betuminosas. Estudos recentes destacam a importância de avaliar e mitigar os efeitos adversos desses materiais, que podem afetar a compacidade da estrutura de agregados, promover a segregação da mistura betuminosa durante a compactação e reduzir a resistência ao envelhecimento do betume (Youssif et al., 2020).

Além disso, a interação entre a RA e o betume utilizado na produção das misturas betuminosas apresenta desafios adicionais. A reutilização de RA pode alterar as propriedades reológicas e a adesividade do betume, influenciando a sua capacidade de revestir adequadamente os agregados e formar uma matriz pétreo coesa. Tal pode resultar numa diminuição do desempenho, nomeadamente, à resistência ao fendilhamento por fadiga e à desagregação da camada betuminosa, especialmente em condições de tráfego intenso e variações climáticas extremas (Wu et al., 2020).

Para superar estes desafios, são necessárias abordagens integradas que considerem uma adequada seleção e processamento da RA, a otimização das formulações de misturas betuminosas e a aplicação de técnicas avançadas de caracterização e monitorização do desempenho. Além disso, é fundamental desenvolver diretrizes práticas e normativas atualizadas que orientem a utilização eficaz e sustentável de misturas betuminosas com reutilização de RA em projetos de pavimentação (Costa et al., 2020).

2.4. Utilização responsável e sustentável de RA

2.4.1. Reciclagem de misturas betuminosas de pavimentos a reabilitar

O principal objetivo da classificação da RA é a criação de *stocks* de material uniforme e homogêneo, os quais podem ser obtidos através de diferentes operações consecutivas como:

1. Identificar a origem das MBaR;

2. O(s) tipo(s) e propriedades dos agregados;
3. Verificar a presença, teor e tipo de qualquer matéria estranha e remover possíveis contaminantes do material não processado;
4. Reduzir o tamanho máximo dos agregados, minimizando a aglomeração de partículas mais finas envolvidas com betume;
5. Criação de frações de RA em *stocks* homogêneos.

O processamento e classificação da RA numa fase anterior à sua utilização em central para produção de novas misturas betuminosas permite, por um lado: (i) a desagregação por britagem dos sobretamanhos da MBaR fazendo com que maior percentagem do material demolido fique apto para nova utilização; (ii) a crivagem da MBaR permite criar *stocks* adequados para várias especificações; (iii) os processamentos anteriores produzem ainda uma redução no teor de humidade das MBaR; (iv) a movimentação do material do *stock* onde a RA foi produzida para o *stock* que irá alimentar a produção na central potencia que o material seja remisturado melhorando a homogeneidade e a redução do teor de humidade antes da produção. (Tarsi et al., 2020).

2.4.2. Adequado armazenamento dos diferentes materiais resultantes da reciclagem

A RA é um recurso valioso que pode ser reintroduzido no ciclo produtivo, reduzindo a necessidade de extração de matérias-primas virgens e minimizando o desperdício. No entanto, garantir que esses materiais alternativos são armazenados corretamente é essencial para preservar a sua qualidade e maximizar a sua potencial reutilização.

No armazenamento de MBaR e RA há cuidados que devem ser tidos em conta de forma a evitar a segregação, a consolidação e a retenção de humidade. Para evitar a segregação e a consolidação são recomendadas a adoção de práticas semelhantes às utilizadas para os agregados virgens, no entanto a retenção de humidade exige atenção adicional. A forma dos *stocks* é importante para a gestão deste tipo de material. De modo a evitar a consolidação dos materiais é recomendada a utilização de equipamentos (e.g. pás carregadoras) de pequena dimensão.

Existem recomendações para que estes materiais sejam armazenados em pilhas em forma de arco ou cone de baixa dimensão, a altura das pilhas deve ser limitada a 9 m para reduzir a auto-compactação.

Para minimizar a retenção da humidade é recomendado que as pilhas não contenham depressões nas superfícies laterais, permitindo o escoamento natural da chuva. Podem ainda ser adotadas

medidas adicionais como cobrir as pilhas e armazenar o material em superfícies pavimentadas com uma inclinação que permita o escoamento da água (Tarsi et al., 2020).

A situação ideal para o armazenamento adequado é a utilização de áreas de armazenamento cobertas e protegidas. Essas áreas protegem os materiais reciclados contra os efeitos climáticos, como a exposição à humidade e à radiação solar, que podem causar degradação permitindo ainda um melhor controlo das temperaturas de fabrico das misturas betuminosas (Dams et al., 2021). Além disso, a adequada segregação das diferentes frações de RA, conforme recomendado por Ribeiro Portugal et al. (2020) e Duan et al. (2019), permite evitar a contaminação cruzada, facilitando a identificação e o acesso aos materiais quando necessário.

Contudo, é importante ressaltar que o armazenamento adequado dos materiais reutilizados não se limita apenas às instalações físicas. É fundamental, implementar sistemas de controlo de qualidade com uma constante monitorização através de ensaios e inspeções visuais, sistemas essenciais para garantir a conformidade dos materiais com as normas e especificações técnicas (Dams et al., 2021; Duan et al., 2019; Ribeiro Portugal et al., 2020).

Em suma, ao implementar as estratégias adequadas de armazenamento, é possível maximizar o potencial de reutilização desses materiais, contribuindo para a redução do impacto ambiental e uma utilização mais eficiente dos recursos naturais.

2.5. Fabrico de misturas betuminosas com reutilização de RA

As centrais de produção de misturas betuminosas dividem-se em dois grupos, centrais descontínuas (por amassadura) e as centrais contínuas ou de tambor-secador. Nas centrais descontínuas o fabrico é realizado por amassadura, em que as quantidades determinadas de agregados e betume (por massa dos materiais), são misturadas numa unidade específica, denominada misturador, até à constituição de uma amassadura. Posteriormente, a amassadura é descarregada para transporte em camiões ou armazenada em silos. Nas centrais contínuas o processo de mistura desenvolve-se no mesmo tambor onde se procede ao aquecimento e secagem dos agregados, na parte final do tambor encontra-se o misturador onde os agregados são misturados com o betume, sendo posteriormente armazenados em silos de onde a mistura betuminosa é descarregada em camiões (Branco et al., 2006).

A metodologia de introdução da RA e a percentagem de reutilização da RA no fabrico de novas misturas betuminosas está dependente do tipo de central e dos dispositivos associados a cada uma delas conforme descrito nos pontos seguintes.

2.5.1. Centrais descontínuas

- **Aquecimento da RA por contacto com os agregados quentes**

A fração de RA é adicionada no misturador proveniente de um silo (à temperatura ambiente) em que a RA pode ser adicionada na balança dos agregados provenientes dos silos quentes após passagem nos crivos quentes (opção 1) ou a RA é pesada numa balança existente no silo de RA e adicionada diretamente no misturador (opção 2). A RA é aquecida no misturador por contacto com os agregados quentes. A temperatura dos agregados virgens é necessária para atingir a temperatura especificada para a mistura betuminosa e depende: (i) da percentagem de RA; (ii) do teor em água da RA e; (iii) da granulometria (quantidade de finos) da RA. A transferência de temperatura dos agregados quentes para a RA é muito rápida, podendo formar-se uma grande quantidade de fumos/vapores que devem ser removidos através dos filtros da central. De forma a evitar um sobreaquecimento do betume virgem por contacto com os agregados virgens sobreaquecidos deve-se efetuar uma pré-mistura dos agregados virgens quentes e da RA antes de adicionar o betume virgem. As centrais que utilizam este método conseguem introduzir até 30 % de RA na produção de novas misturas betuminosas. Na Figura 5 é apresentado o esboço de uma central de produção de mistura betuminosa descontínua com os sistemas de introdução de RA acima descritos (PIARC, 2021).

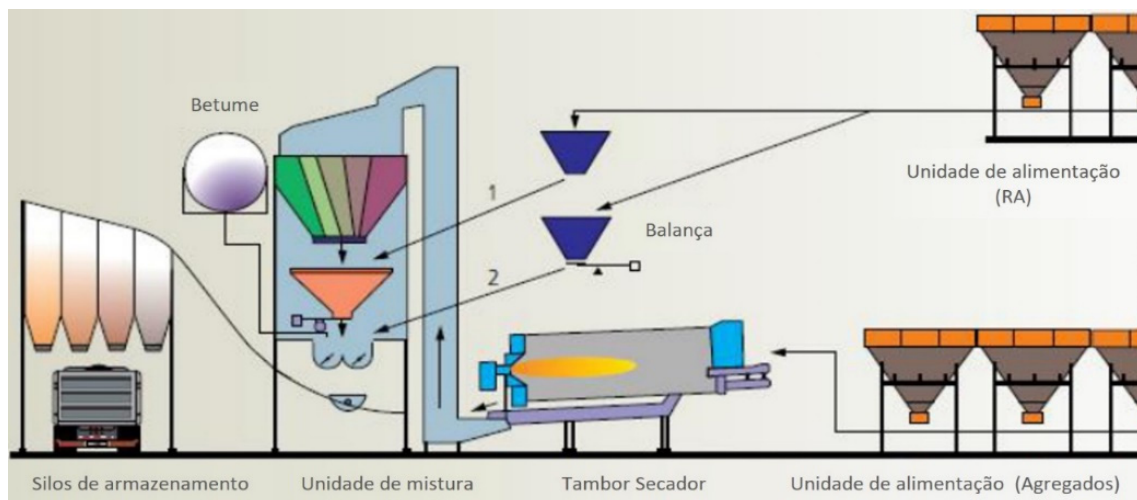


Figura 5 - Central de produção de misturas betuminosas descontínua com aquecimento da RA por contacto com os agregados quentes.

(1)-Adição na balança dos agregados | (2)-Adição direta no misturador (adaptado de PIARC, 2021).

- **Aquecimento da RA por contacto com os agregados quentes - sem crivagem dos agregados a quente**

A adição da RA ocorre no processo entre o final do aquecimento dos agregados virgens e a pesagem dos agregados quentes. Existem três momentos onde a RA pode ser adicionada, junto dos agregados virgens à saída do tambor-secador (opção 1), no sistema de elevação dos agregados virgens para os silos quentes (opção 2) ou diretamente nos silos quentes (opção 3).

A quantidade de RA que entra na mistura betuminosa é controlada por uma balança acoplada na passadeira de transporte. O tempo de transferência de temperatura dos agregados virgens quentes para a RA é maior neste processo, pelo que a formação do vapor de água e fumos também se estende por mais tempo e pode, por isso, ser mais facilmente processada pelo sistema de recolha de poeiras e fumos da central. A crivagem a quente dos agregados virgens e da mistura betuminosa recuperada neste processo já não é possível uma vez que o betume da RA aquecida iria colmatar os crivos. Por conseguinte, a correção da distribuição granulométrica das partículas deixa de ser possível neste método. A utilização deste processo necessita de um controlo granulométrico mais rigoroso de todas as frações de agregados virgens e RA introduzidas. As centrais que utilizam este método conseguem introduzir até 40 % de RA na produção de novas misturas betuminosas. Na Figura 6 é apresentado o esboço de uma central de produção de mistura betuminosa descontínua com os sistemas de introdução de RA anteriormente descritos (PIARC, 2021).

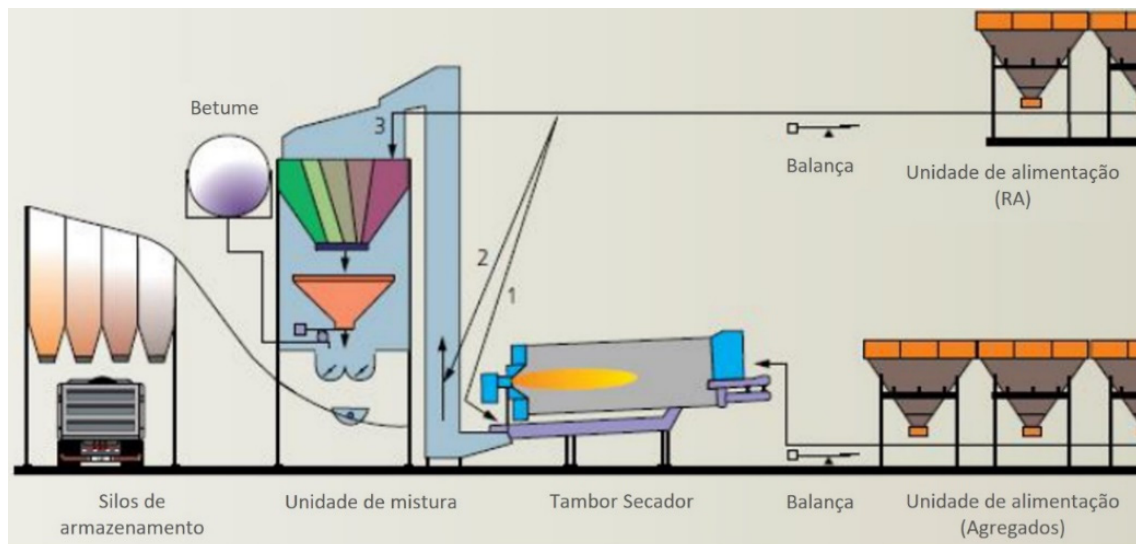


Figura 6 - Central de produção de misturas betuminosas descontínua com aquecimento da RA por contacto com os agregados quentes sem crivagem a quente.

(1)-Adição à saída do tambor | (2)-Adição no sistema de elevação dos agregados quentes | (3)-Adição diretamente nos silos quentes (adaptado de PIARC, 2021).

- **Aquecimento da RA juntamente com os agregados virgens**

A RA é aquecida juntamente com o agregado virgem no tambor-secador, que possui instalações especiais para adição de RA, por exemplo, a RA é introduzida à temperatura ambiente num anel de reciclagem sensivelmente a meio do tambor-secador após a chama do queimador (opção 1) ou através de outros sistemas de introdução no tambor-secador garantindo que a RA não entre em contacto com a chama (opção 2). O fluxo de abastecimento da RA e dos agregados virgens é controlado por sistema de pesagem colocado na passadeira de transporte entre as tolvas e o tambor-secador. Questões relacionadas com a formação de vapor de água utilizando este método, como regra não são relevantes. À semelhança da central anterior, a crivagem a quente dos agregados virgens e da mistura betuminosa recuperada neste processo já não é possível uma vez que o betume da RA aquecido iria colmatar os crivos. Por conseguinte, a correção da distribuição granulométrica das partículas deixa de ser possível neste método. A utilização deste processo necessita de um controlo granulométrico mais rigoroso de todas as frações agregados virgens e RA introduzidos. As centrais que utilizam este método conseguem introduzir até 40 % de RA na produção de novas misturas betuminosas. Na Figura 7 é apresentado o esboço de uma central de produção de mistura betuminosa descontínua com os sistemas de introdução de RA acima descritos (PIARC, 2021).

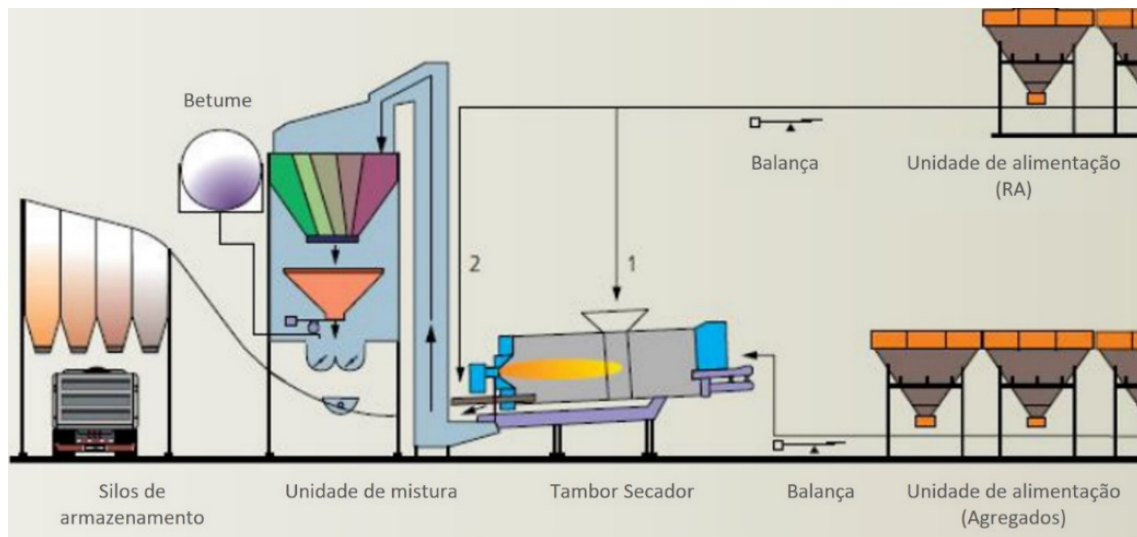


Figura 7 - Central de produção de misturas betuminosas descontínua com aquecimento da RA juntamente com os agregados virgens.

(1)-Adição da RA em anel de reciclagem | (2)-Adição da RA no tambor-secador por sistemas alternativos (adaptado de PIARC, 2021).

- **Aquecimento da RA num tambor-secador paralelo**

O sistema de introdução de RA é igual ao descrito para as centrais descontínuas com sistema de crivagem a quente, residindo a diferença no facto da RA ser previamente aquecida num tambor-secador paralelo. A utilização de um tambor-secador paralelo permite adicionar uma quantidade muito alta de RA na mistura betuminosa, teoricamente esse valor pode chegar a 100%. Outra vantagem é que os agregados virgens quentes podem ser crivados e doseados com precisão. Para o aquecimento da RA, recomenda-se a utilização do tambor-secador paralelo equipado com queimador em contra fluxo, para não afetar negativamente as propriedades do betume e reduzir as emissões de gases com efeito de estufa perigosas para o ambiente e saúde. A RA deve ser aquecida a uma temperatura não superior a 130 °C. O armazenamento da RA aquecida num silo com isolamento térmico também é uma opção. A quantidade máxima adicionada de RA depende da homogeneidade e das características de desempenho relevantes. Na Figura 8 é apresentado o esboço de uma central de produção de mistura betuminosa descontínua com os sistemas de introdução de RA acima descritos (PIARC, 2021).

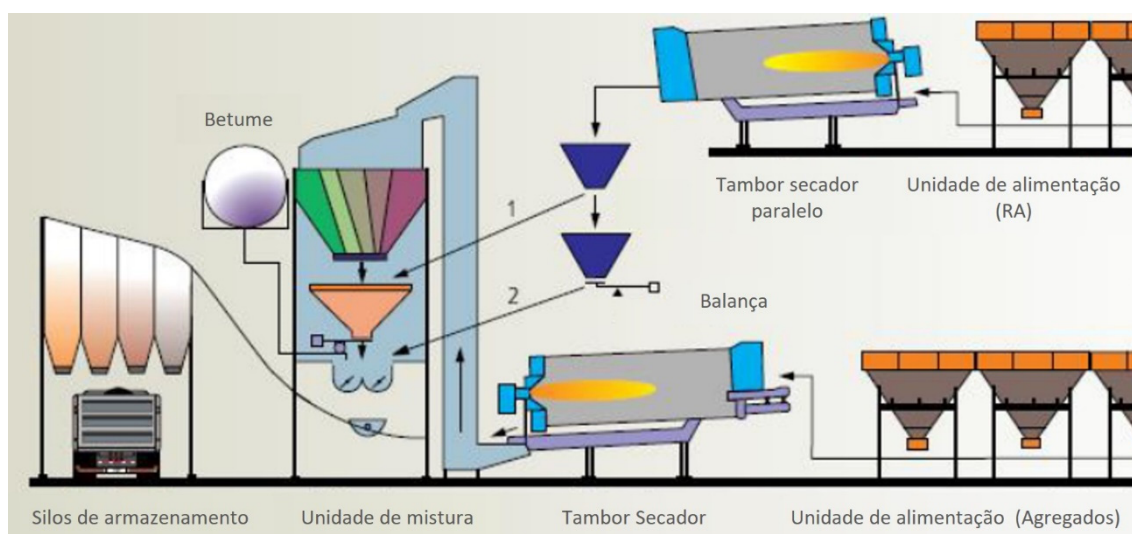


Figura 8 - Central betuminosa descontínua com aquecimento da RA num tambor-secador paralelo. (1)-Adição na balança dos agregados | (2)-Adição direta no misturador (adaptado de PIARC, 2021).

2.5.2. Centrais contínuas

As centrais contínuas podem ter duas configurações: fluxo paralelo (Figura 9) e contra fluxo (Figura 10). As centrais de fluxo paralelo que também podem ser designadas por centrais de tambor-secador misturador que, como o próprio nome indica, consistem um tambor que para além de secar e aquecer os agregados também efetua a mistura. Os agregados são introduzidos à temperatura ambiente e doseados por massa na mesma parte do tambor-secador-queimador,

circulando neste caso na direção da corrente de gases quentes. Na primeira parte do tambor é feita a secagem e o aquecimento dos agregados, sensivelmente a meio é introduzida a RA na segunda parte do tambor é introduzido o betume e efetuada a mistura. Na parte final existe um sistema de recuperação de poeiras e fumos e uma saída da mistura pronta que segue para um silo de armazenamento (Branco et al., 2006).

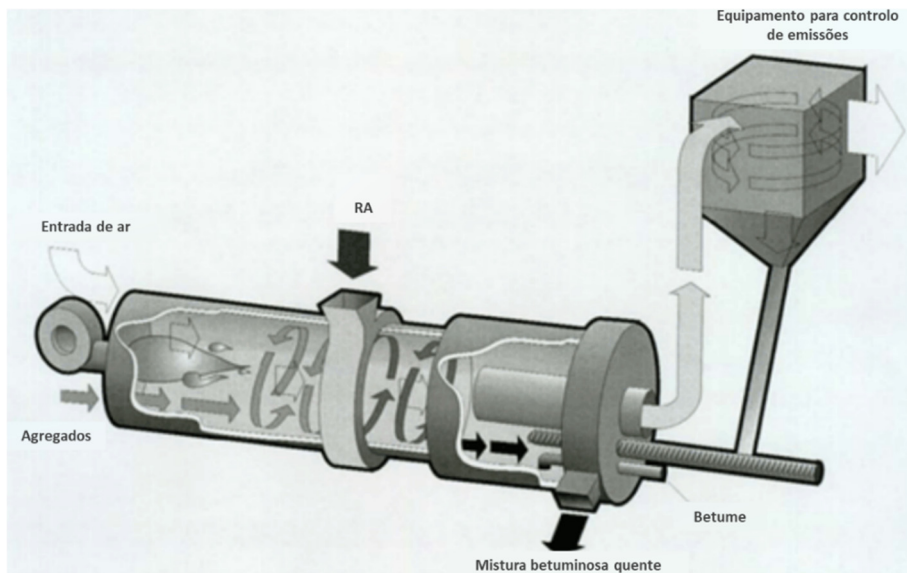


Figura 9 - Tambor de aquecimento, secagem e mistura de fluxo paralelo.
Fonte: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/98042/06.cfm>

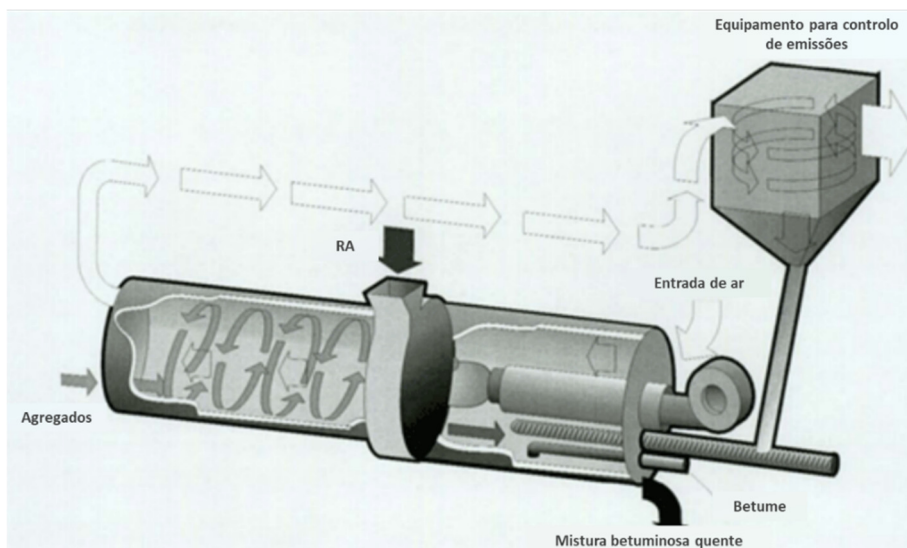


Figura 10 - Tambor de aquecimento, secagem e mistura em contra fluxo.
Fonte: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/98042/06.cfm>

As centrais de contra fluxo diferem das centrais tradicionais de fluxo paralelo pelo facto do sentido do fluxo dos gases de combustão quentes ser contrário ao sentido de deslocação dos agregados. O princípio de fluxos opostos permite reduzir a temperatura dos gases quentes e melhora o desempenho do ponto de vista ambiental através de um aquecimento menos intenso da RA. Nestas centrais os agregados são incorporados numa das extremidades do tambor, oposta ao queimador e a RA entra na zona central do tambor. A boca do queimador está localizada no extremo de um tubo com uma determinada extensão no interior do tambor, que permite que o pré-aquecimento da RA se efetue atrás da chama antes de entrar na zona de mistura. Neste tipo de central a RA e o betume nunca estão em contacto direto com a chama ou com os gases aquecidos. Este processo permite taxas de reutilização até cerca de 50 %.

Outro método utilizado é o tambor-secador-misturador de duplo invólucro, este sistema consiste num tambor rotativo tradicional de fluxos contracorrente, envolvido por um tambor exterior fixo. A RA é introduzida no tambor exterior, exterior ao fluxo de gás quente. Os agregados virgens a reutilizar são secos e aquecidos no tambor interior, que de seguida são introduzidos no tambor exterior caindo através de aberturas existentes no tambor interior. Os agregados virgens misturam-se com a RA e com o betume virgem e a mistura processa-se no espaço compreendido entre os dois tambores por pás de forno montadas na parede exterior do tambor interior (INIR, 2006).

Com as centrais contínuas é possível optar por um aquecimento separado da RA num segundo tambor paralelo. Para não afetar negativamente as propriedades do betume, a RA deve ser aquecida a uma temperatura não superior a 130 °C. A utilização de um tambor-secador paralelo permite adicionar quantidades elevadas de RA à mistura betuminosa. Na Figura 11 é apresentado o esboço de uma central de produção de mistura betuminosa contínua com os sistemas de introdução de RA acima descritos (PIARC, 2021).

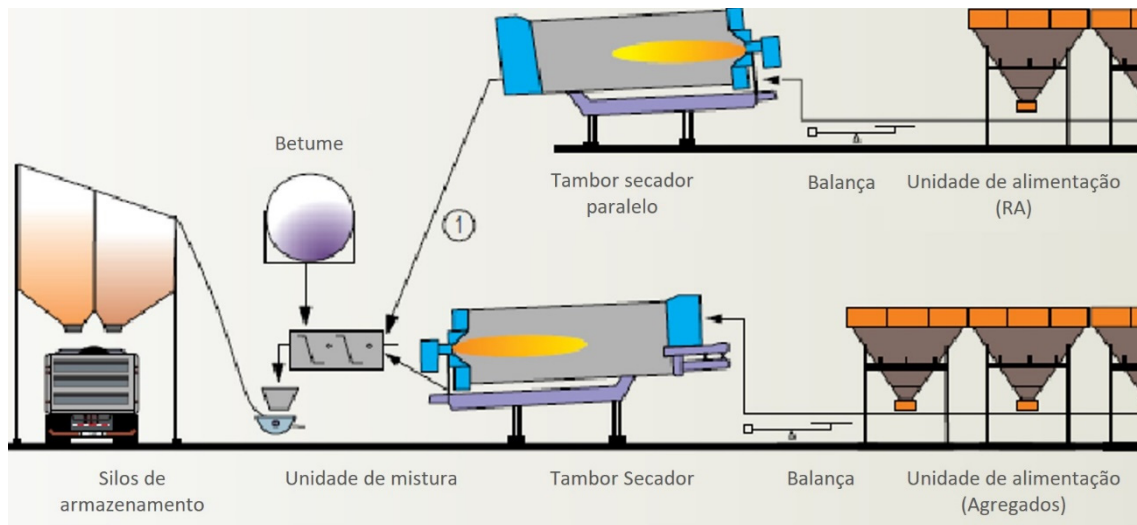


Figura 11 - Central de produção de misturas betuminosas contínuas com tambor-secador paralelo (adaptado de PIARC, 2021).

2.5.3. Metodologias para adição de aditivos

Independentemente do tipo de central utilizada para fabrico de misturas betuminosas com reutilização de RA, o fabrico de misturas betuminosas com RA tende a requer a utilização de um aditivo amolecedor/rejuvenescedor, pelo que importa referir seguidamente os diferentes procedimentos para a adição dos aditivos nas centrais de misturas betuminosas, Figura 12 à Figura 15.

- **Adicionado em simultâneo com o betume**

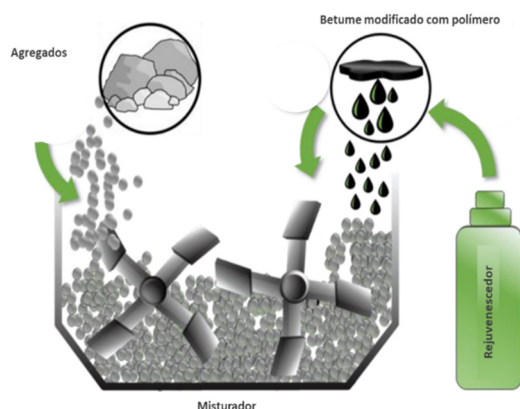


Figura 12 - Aditivo adicionado em simultâneo com o betume (adaptado de Eskandarsefat, 2022).

- **Incorporado no betume**



Figura 13 - Aditivo incorporado no betume (adaptado de Eskandarsefat, 2022).

- **Adicionado sobre a RA na passadeira de transporte**

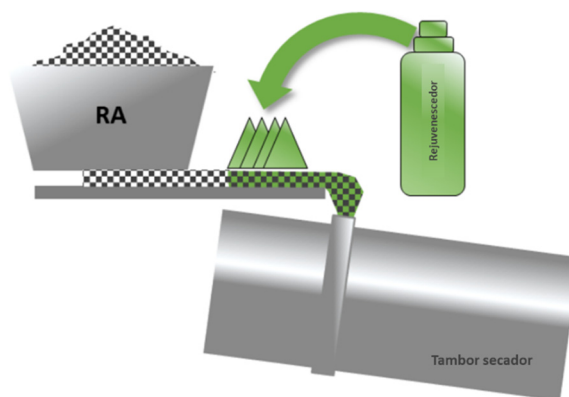


Figura 14 - Aditivo adicionado sobre a RA na passadeira de transporte (adaptado de Eskandarsefat, 2022).

- **Adicionado sobre a RA quente no sistema de elevação**

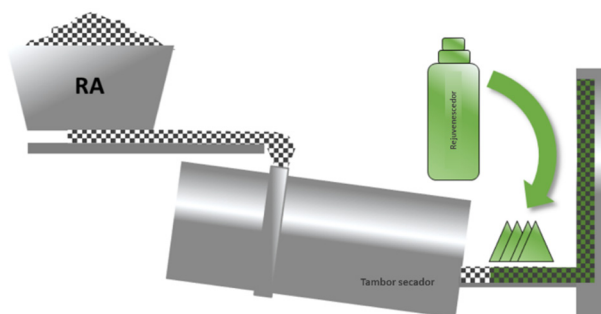


Figura 15 - Aditivo adicionado sobre a RA aquecida (adaptado de Eskandarsefat, 2022).

2.6. Multi-reutilização de misturas betuminosas com RA

Uma mistura betuminosa tem um período de utilização limitado e, portanto, deve ser substituída após esse período. As misturas betuminosas recuperadas em uso passarão por um período de fim de vida novamente e precisarão ser substituídas e, conseqüentemente, recuperadas. Portanto, a capacidade de multi-reutilização da mistura betuminosa precisa ser avaliada. Vários estudos laboratoriais e em obra têm (Antunes et al., 2021) demonstrado que a RA tem a capacidade de ser reutilizada e incorporada em novas misturas betuminosas sem que a sua funcionalidade seja degradada.

Exemplo é o estudo de Antunes et al. (2021) que se observou uma melhoria na durabilidade das camadas de desgaste de pavimentos rodoviários, com uma redução de 20 % na taxa de formação de fendas e uma diminuição de 15 % na necessidade de manutenção corretiva ao longo do período de vida útil do pavimento.

Noutro estudo (Vandewalle, 2019), por sua vez, adotou uma abordagem mais experimental, focando na avaliação técnica da multi-reutilização de RA em misturas betuminosas recuperadas. A pesquisa envolveu a realização de ensaios laboratoriais detalhados para determinar as propriedades mecânicas, de adesão e durabilidade das misturas contendo diferentes proporções de RA. Os resultados mostraram que a adição de RA em taxas mais elevadas, até 50 %, não comprometeu significativamente as propriedades mecânicas das misturas, mantendo uma resistência à tração e compressão adequadas.

Além disso, foram realizados ensaios de campo para validar os resultados obtidos em laboratório e verificar o desempenho das misturas em condições reais de tráfego e ambiente. Esses ensaios de campo incluíram a monitorização do comportamento do pavimento em termos de resistência à fadiga, deformação permanente e rutura, proporcionando uma avaliação holística do desempenho das misturas em uso prático. Os resultados foram então comparados com modelos de previsão de desempenho para verificar a validade das técnicas de ensaio utilizadas e avaliar a eficácia da multi-reutilização de RA como uma estratégia de pavimentação sustentável.

Estes estudos oferecem contributos significativos para a indústria da pavimentação, ao evidenciarem não apenas os benefícios ambientais e económicos associados à reutilização múltipla de RA, mas também a sua viabilidade técnica, desde que sejam implementadas práticas adequadas de processamento e definição da quantidade de RA a introduzir. Adicionalmente, realçam a importância da investigação contínua para o aperfeiçoamento das técnicas de reutilização de

materiais e a promoção de uma abordagem mais sustentável na construção e manutenção de pavimentos.

2.7. Contributo ambiental e económico da reutilização de RA

O desenvolvimento sustentável é a satisfação das necessidades do presente e o avanço tecnológico com os menores custos ambientais e económicos possíveis de forma a não comprometer as futuras gerações a satisfazerem as suas próprias necessidades.

Sendo o transporte uma das principais necessidades dos seres humanos, o desenvolvimento de infraestruturas de transporte sustentáveis é uma preocupação fundamental. A principal Infraestrutura de transporte no mundo é a rede rodoviária, sendo que nesta rede 85 a 90% é constituída por pavimentos construído com misturas betuminosas (EAPA, 2022b). Por conseguinte, tendo em conta a importância destas infraestruturas e a necessidade de manter um desempenho adequado a curto e a longo prazo, são produzidas anualmente muitas toneladas de misturas betuminosas. Em 2023 terão sido produzidas segundo a EAPA mais de 670 milhões de toneladas em todo o mundo (EAPA, 2022b).

Em fevereiro de 2022, a Comissão europeia adotou a Diretriz de *Due Diligence de Sustentabilidade Corporativa* (CSDD), esta diretriz visa promover um comportamento empresarial sustentável e responsável ao longo das cadeias de valor globais, estabelecendo um quadro jurídico que obriga as empresas a identificar, prevenir, cessar ou mitigar os impactos adversos das suas atividades nos direitos humanos e no ambiente. O principal objetivo do CSDD é garantir que as empresas operem de forma sustentável e responsável. Esta diretriz, alicerçada na sustentabilidade, procura proteger o ambiente, garantir a justiça social e promover uma economia mais forte e sustentável (Commission European, 2022).

Com este enquadramento as empresas estão a integrar cada vez mais nos seus modelos de gestão, o pilar da Sustentabilidade, implementando nos seus processos de decisão aspetos mais transversais a todo o ciclo de vida dos seus ativos e não se focando apenas nos aspetos económicos do negócio. As empresas que atuam no setor rodoviário e que gerem o ativo pavimento têm assim, procurado adotar novas soluções e práticas sustentáveis na construção e manutenção dos pavimentos.

A abordagem geral para melhorar a sustentabilidade consiste em reduzir a energia consumida, as emissões geradas e as quantidades de material virgem utilizado. Isto significa implementar a manutenção preventiva, por forma a prolongar a vida dos pavimentos, reduzir a temperatura de

produção e aplicação das misturas betuminosas e reutilizar os agregados e o betume dos pavimentos demolidos. Um dos métodos mais comuns para responder a estas preocupações e quantificar corretamente as emissões, bem como o consumo de materiais e energia, é a avaliação do ciclo de vida (ACV) (Vandewalle et al., 2020).

A metodologia da avaliação de ciclo de vida (ACV) foi normalizada nas normas ISO 14040 e ISO 14044, estas normas estabelecem os princípios e a estrutura geral para a realização de uma ACV, as fases de uma ACV são quatro e estão representadas na Figura 16 (Soares et al., 2023).

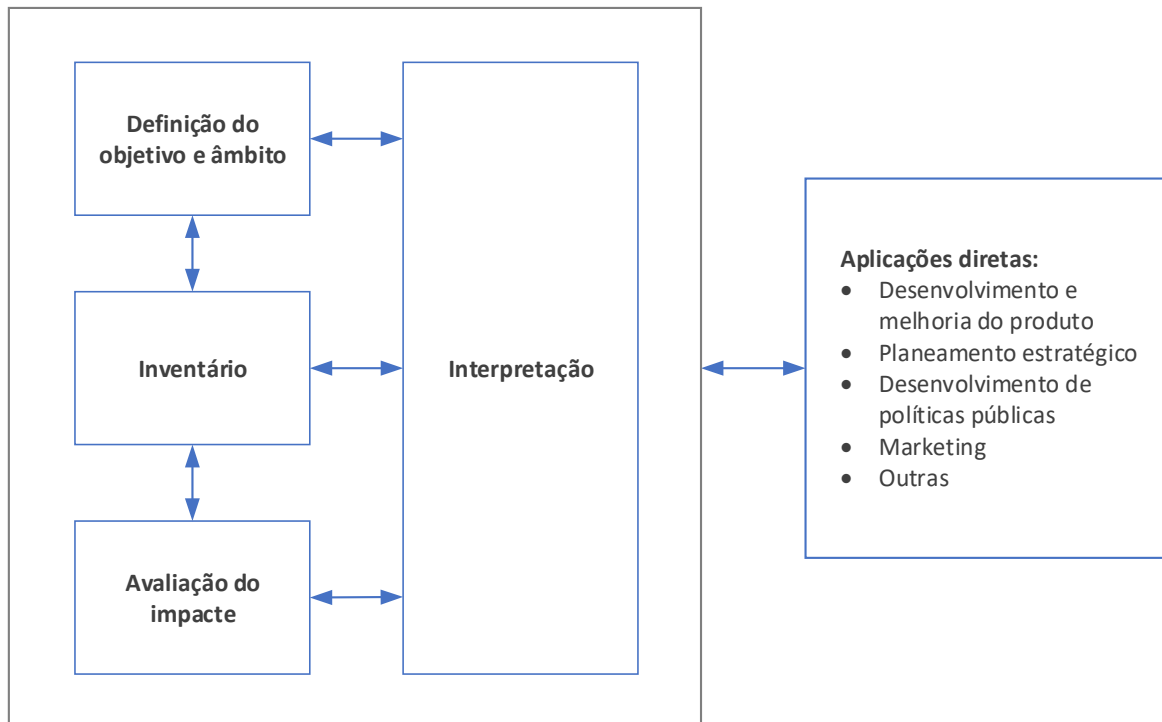


Figura 16 - Fases de uma avaliação de ciclo de vida (ACV) (adaptado de Soares et al., 2023)

Quando estão a ser desenvolvidos materiais e/ou soluções inovadoras, a utilização de ferramentas de ACV permite avaliar os ganhos ou as perdas em termos de impactos ambientais. Estas ferramentas são adequadas para medir os benefícios em termos de redução da utilização de matérias-primas e de recursos não renováveis, quando são incluídos materiais reciclados nas soluções adotadas (Vandewalle et al., 2020).

A reciclagem e reutilização de misturas betuminosas é um progresso no sentido de alcançar soluções de pavimentação sustentáveis, dando um contributo importante para que a indústria da pavimentação atinja o desenvolvimento económico e ambiental sustentável (Vandewalle et al., 2020). Um pavimento sustentável assegura a durabilidade, o alinhamento com os fatores económicos e promove a proteção do meio ambiente.

A Figura 17 apresenta o equilíbrio que se procura entre os três fatores quando se avalia uma solução para a construção de um pavimento sustentável.



Figura 17 - Componentes para um pavimento sustentável.

No que concerne à componente ambiental, a utilização de misturas betuminosas recuperadas dos pavimentos demolidos é uma solução que permite preservar os recursos naturais e reduzir a emissão de GEE, uma vez que produção de matérias-primas é um dos maiores contribuintes para as emissões de GEE de acordo com Figura 18. Complementarmente permite ainda evitar a deposição de resíduos perigosos e nocivos para o ambiente, contribuindo para a construção de pavimentos mais sustentáveis (Pouranian & Shishehbor, 2019).

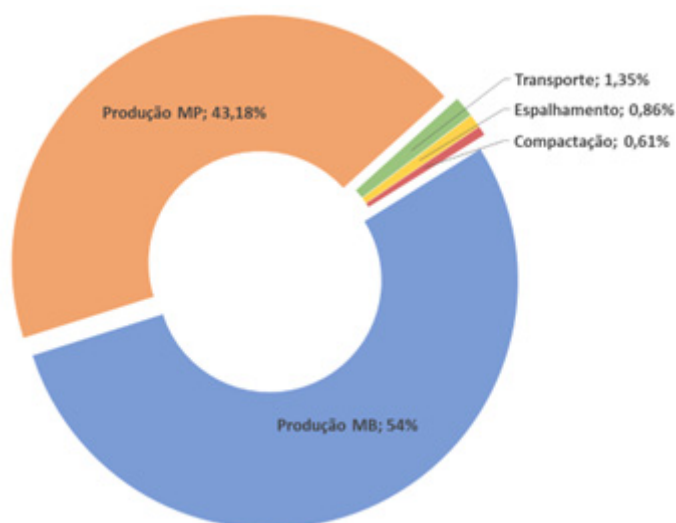


Figura 18 - Distribuição das emissões de CO₂e no processo de construção do pavimento (adaptado de Tarsi et al., 2020).

A reciclagem e reutilização de misturas betuminosas em aplicações semelhantes traz benefícios ambientais e económicos (Zaumanis et al., 2014), a redução na quantidade de agregados virgens e ligante betuminosos e a consequente redução do seu transporte para os locais de produção resulta em benefícios económicos (Tabela 1). A poupança de matérias-primas tem um impacto direto na redução das emissões de GEE e de consumo de combustíveis decorrentes das atividades de extração, processamento e transporte destes materiais. Além disso, conduz a uma menor necessidade de recursos não renováveis, transporte para aterros e utilização de espaço para a eliminação de materiais de pavimentos demolidos.

De acordo com Pouranian & Shishehbor (2019) a utilização de RA permite não só diminuir a quantidade de agregado virgem na produção de novas misturas betuminosas, mas também diminuir a quantidade necessária do componente mais valioso das misturas betuminosas, decorrente da reutilização do betume envelhecido presente na RA.

Tabela 1- Redução de custos nas matérias-primas virgens pela utilização de RA nos EUA (adaptado de Pouranian & Shishehbor, 2019).

Material	Quantidade de material (mil milhões de toneladas)			Redução de custos nos agregados (mil milhões de dólares)			Redução de custos nos betumes (mil milhões de dólares)			Redução de custo total (mil milhões de dólares)		
	2015	2016	2017	2015	2016	2017	2015	2016	2017	2015	2016	2017
RA	74,2	76,9	76,2	0,663	0,713	0,734	1,787	1,333	1,393	2,450	2,046	2,127

Embora a bibliografia indique que a utilização de RA permite a redução de custos na produção de novas misturas betuminosas, como evidenciado por Tarsi et al. (2020) na Figura 19, é fundamental introduzir nesta análise a avaliação do desempenho das misturas betuminosas em função da percentagem de reutilização de RA.

O tema da avaliação de desempenho de misturas betuminosas com reutilização de diferentes percentagens de RA tem sido alvo de diversos estudos e investigação. Relativamente à resistência à deformação permanente foram reportados resultados que indicam uma melhoria com a introdução de RA, devido à maior rigidez do betume envelhecido, já na resistência à fadiga os resultados não são tão consensuais e a inconsistência agrava-se quando se avalia a temperaturas mais baixas. A rigidez adicional das misturas betuminosas com RA pode aumentar a suscetibilidade ao aparecimento de fissuração, principalmente em climas mais frios (Yu et al., 2024).

Segundo Pouranian & Shishehbor (2019) e com base numa análise de ACV foram avaliados três cenários de desagregação do desempenho de misturas betuminosas produzidas com RA nas percentagens de 20 %, 30 % e 50 %. O primeiro cenário considera que o desempenho da mistura

betuminosa com RA é 100 % semelhante à mistura betuminosa de referência (controlo), o segundo cenário considera que a mistura betuminosa com RA apresentou um desempenho de 85 % relativamente à mistura betuminosa de referência, por fim, o terceiro cenário considera que a mistura betuminosa com RA apresenta apenas 70 % do desempenho.

Foram avaliados para cada cenário o consumo de energia por quilómetro e as emissões de GEE na Figura 19 e na Figura 20, respetivamente.

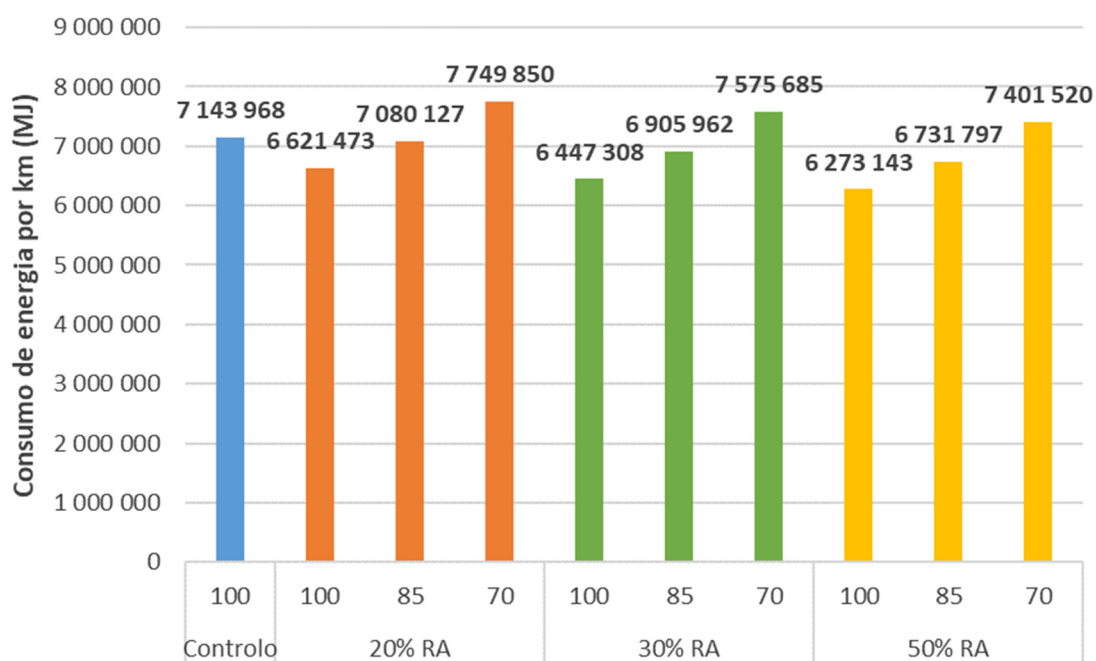


Figura 19 - Consumo de energia para diferentes percentagens de RA em diferentes cenários de desempenho (adaptado de Pouranian & Shishehbor, 2019).

A preparação das matérias-primas para a produção de misturas betuminosas, agregado e betume exige consumo de energia, a substituição de parte desta matéria-prima por parte de RA tem consequências ao nível dos consumos de energia. De um modo geral os seguintes fatores têm impacto na energia necessária para a produção de misturas betuminosas com incorporação de RA: i) o teor de humidade do RA; ii) temperatura da mistura betuminosa no local de aplicação, iii) percentagem de reutilização de RA; iv) processo de transporte. Dependendo da tecnologia disponível nas instalações industriais de produção das misturas betuminosas, onde o RA pode ser adicionado: i) a frio aos materiais virgens sobreaquecidos no misturador ou tambor/secador, abordagem mais utilizada e mais facilmente implementada nas centrais sem grande investimento; ii) ou a RA pode ser adicionada após um pré-aquecimento, num tambor secador paralelo, esta abordagem embora exija um investimento maior na modificação das centrais de produção, permite

controlar de forma mais eficaz o teor de humidade do RA, permitindo uma redução nas temperaturas de aquecimento dos agregados virgens e de mistura, com esta tecnologia é ainda possível introduzir percentagens mais elevadas de RA (Pouranian & Shishehbor, 2019).

A comparação entre as emissões de GEE para misturas betuminosas produzidas apenas com materiais virgens e misturas betuminosas com 20% de RA, revelou que a adição de RA pode resultar numa redução média de 8,3% nos parâmetros de poluentes atmosféricos, tais como monóxido de carbono (CO), óxidos de enxofre (SOx), óxidos de azoto (NOx), compostos orgânicos voláteis (COV) e partículas (PM) (Pouranian & Shishehbor, 2019).

Pode observar-se que há uma redução dos consumos de energia e das emissões com o aumento da percentagem de reutilização de RA. Com base nos indicadores de ponto médio que avalia os impactes ambientais numa fase intermédia antes de chegarem às consequências finais nos seres humanos, ecossistemas e recursos (alterações climáticas, depleção de recursos fósseis, acidificação, etc.) e no indicador de ponto final que agrega os impactes ambientais ao longo das cadeias de causa-efeito até às consequências finais sobre áreas de proteção (como saúde humana, qualidade dos ecossistemas e disponibilidade de recursos), os resultados de um estudo revelaram que a adição de 15% de RA às misturas betuminosas produzidas a quente ou às temperadas, poderiam resultar numa redução de 13-14% na maioria dos impactes de ponto médio e de ponto final (Pouranian & Shishehbor, 2019).

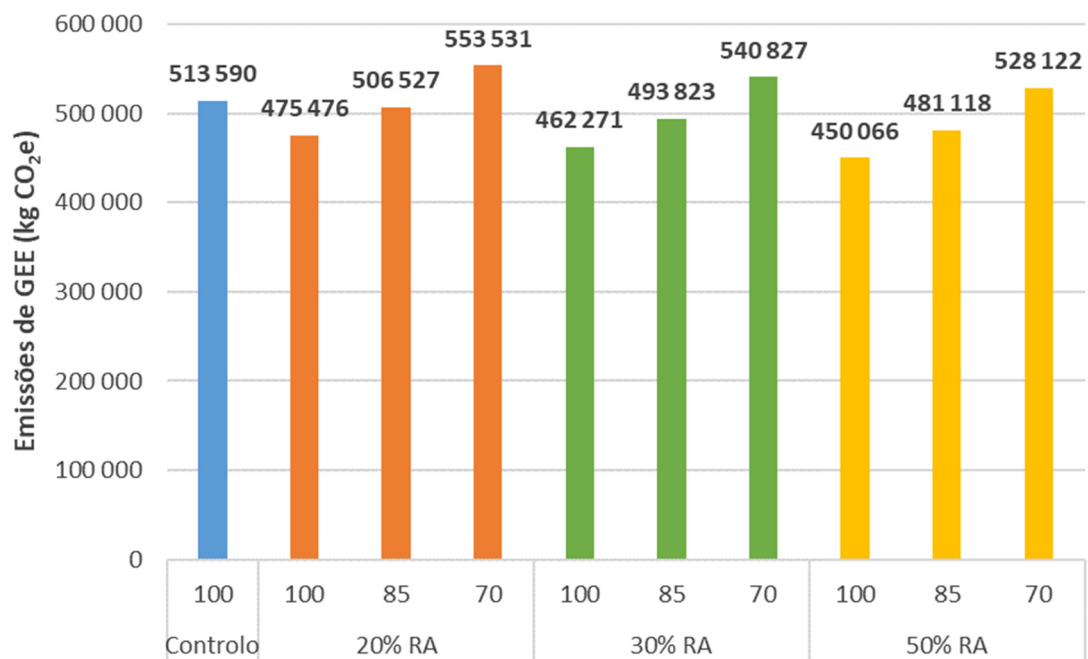


Figura 20 - Emissões de GEE para diferentes percentagens de RA em diferentes cenários de desempenho (adaptado de Pouranian & Shishehbor, 2019).

Segundo a Figura 19 e Figura 20, pode concluir-se que para todas as percentagens de RA, o cenário no qual o desempenho da mistura betuminosa é reduzido para 70 % exige mais energia na produção e produz mais CO₂e que a mistura betuminosa de referência. Conclui-se assim, que o desempenho é um fator crítico na avaliação dos benefícios da utilização de RA na produção de novas misturas betuminosas.

Com o desenvolvimento tecnológico das modernas centrais de produção de misturas betuminosas, com um melhor processamento das RA, com a definição de um controlo da qualidade mais adequado à medição do desempenho das misturas betuminosas com RA e com o desenvolvimento de aditivos para minimizar os efeitos negativos dos betumes envelhecidos, será possível introduzir cada vez maiores percentagens de RA nas misturas betuminosas sem comprometer o desempenho do produto, isto fará do RA um material tão valioso como o agregado virgem e o betume. Um estudo referiu que a utilização de 20 % a 50 % de RA em novas misturas betuminosas, resultou em poupanças de 14 % a 34 % nos custos de material e produção (Kandhal, 1997).

[página propositadamente em branco]

Capítulo III

Caso de estudio

[página propositadamente em branco]

3. Caso de estudo

3.1. Programa experimental

O programa experimental definido teve como objetivo principal avaliar a viabilidade e os efeitos da reutilização de 20% de RA, proveniente de uma camada de desgaste em betão betuminoso drenante (PA 12,5 Surf PMB 45/80-60) em fim de vida útil, numa nova camada de desgaste em betão betuminoso rugoso (AC 14 Surf PMB 45/80-65). O programa experimental abrangeu a análise de onze misturas betuminosas, que incluíram duas fontes diferentes de RA (com fração granulométrica de 0/10 mm), dois tipos de betume modificado com polímeros (PMB), e dois tipos de aditivos rejuvenescedores distintos. O primeiro aditivo foi incorporado de forma sólida diretamente à mistura, através da adição por via seca, enquanto o segundo foi adicionado ao betume já fornecido pelo fabricante.

De forma a simular as condições de produção industrial, as misturas betuminosas foram fabricadas em laboratório utilizando a técnica de adição de RA à temperatura ambiente, em que a RA é introduzida no misturador à temperatura ambiente, tendo-se procurado reproduzir o procedimento utilizado em centrais de produção descontínua.

A Tabela 2 sintetiza as designações definidas para as misturas betuminosas estudadas no âmbito do presente trabalho.

Tabela 2 - Misturas betuminosas estudadas.

Referência		Designação	
A3 - Águas Santas/Maia (Gabriel Couto)	Laboratório	M1-REF	AC 14 Surf PMB 45/80-65 (BBr)
		M1.1	AC 14 Surf PMB 45/80-65 (BBr) + 20% 16 RA 0/10 mm + Viatop plus RC (1.5 kg/t)
		M1.2	AC 14 Surf PMB 45/80-65 Regener (BBr) + 20% 16 RA 0/10 mm
	Trecho Experimental	M1.1-TE	AC 14 Surf PMB 45/80-65 (BBr) + 20% 16 RA 0/10 mm + Viatop plus RC (1.5kg/t)
		M1.2-TE	AC 14 Surf PMB 45/80-65 Regener (BBr) + 20% 16 RA 0/10 mm
	Trecho Piloto	M1.1-TP	AC 14 Surf PMB 45/80-65 (BBr) + 20% 16 RA 0/10 mm + Viatop plus RC (1.5 kg/t)
M1.2-TP		AC 14 Surf PMB 45/80-65 Regener (BBr) + 20% 16 RA 0/10 mm	
A3 - Braga Oeste/EN 201 (Mota Engil)	Laboratório	M2-REF	AC 14 Surf PMB 45/80-65 (BBr)
		M2.2	AC 14 Surf PMB 45/80-65 Regener (BBr) + 20% 16 RA 0/10 mm
	Trecho Experimental	M2.2-TE	AC 14 Surf PMB 45/80-65 Regener (BBr) + 20% 16 RA 0/10 mm
	Trecho Piloto	M2.2-TP	AC 14 Surf PMB 45/80-65 Regener (BBr) + 20% 16 RA 0/10 mm

O estudo da viabilidade da reutilização de 20 % de RA em misturas betuminosas a aplicar numa camada de desgaste de autoestrada foi concretizado segundo o programa experimental apresentado na Figura 21.

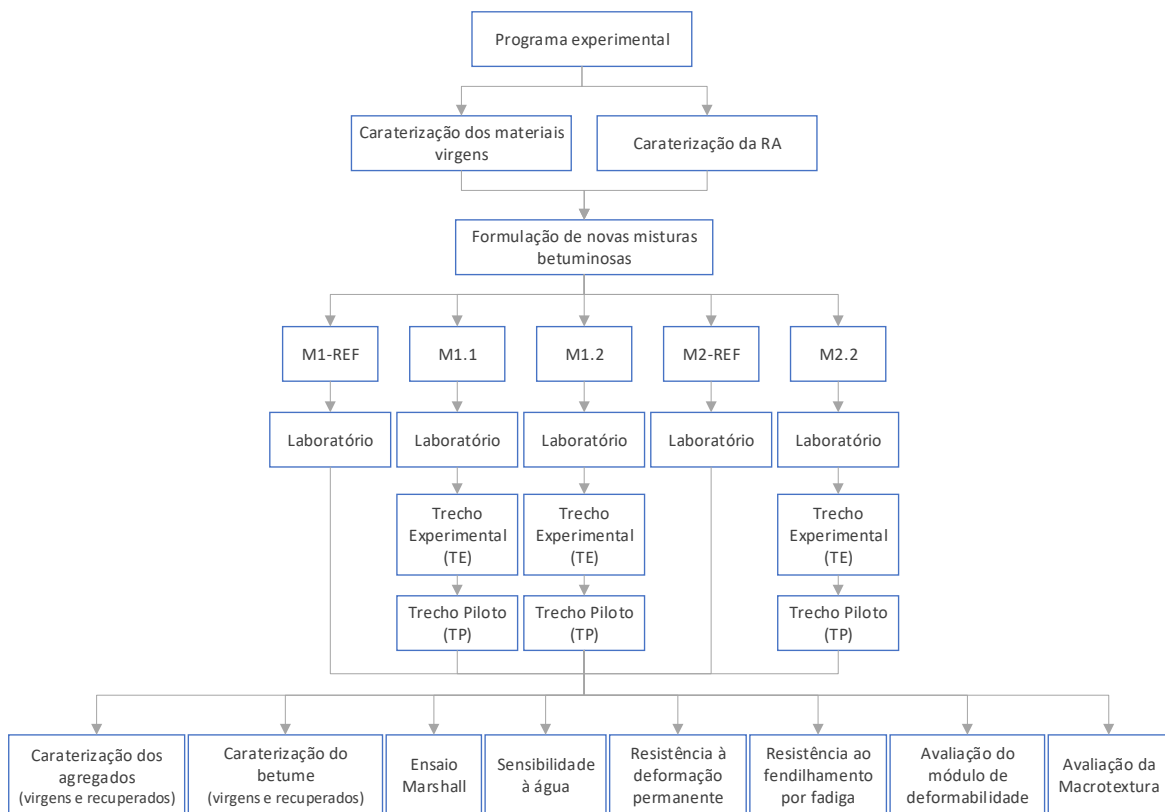


Figura 21 - Programa Experimental.

Na Tabela 3 são apresentados os ensaios para caracterização dos agregados virgens, filer e RA utilizados no presente estudo.

Tabela 3 - Caracterização dos agregados, filer e RA.

Avaliação realizada		Referência normativa	Agregados virgens				RA
			Fração grossa	Fração intermédia	Fração fina	Filer comercial	U RA d/D mm
Análise granulometria		EN 933-1 ^a EN 933-10 ^b EN 12697-2 ^c	▪	▪	▪	▪	▪
Conteúdo de finos		EN 933-1	▪	▪			
Qualidade dos finos	Equivalente de areia (0/2 mm)	EN 933-8			▪		
	Azul de metileno (0/2 mm)	EN 933-9			▪		
Forma do agregado grosso – Índice de achatamento		EN 933-3	▪	▪			▪
Forma do agregado grosso – Índice de alongamento		BS 812:1990 (secção 105.2)	▪	▪			▪
Resistência à fragmentação do agregado grosso, coeficiente de Los Angeles		EN 1097-2	▪				
Resistência ao desgaste do agregado grosso, coeficiente de micro-Deval		EN 1097-1	▪				
Massa volúmica das partículas		EN 1097-6	▪	▪	▪		
Absorção de água		EN 1097-6	▪	▪	▪		
Determinação da percentagem de betume		EN 12697-1					▪
Penetração		EN 1426					▪
Temperatura de amolecimento		EN 1427					▪
OBSERVAÇÕES:		^a Análise granulométrica · agregados virgens ^b Análise granulométrica · filer ^c Análise granulométrica · RA, após a extração do betume					

Numa primeira fase, de acordo com a informação sintetizada na Tabela 3, os materiais pétreos, foram avaliados relativamente à distribuição granulométrica de acordo com a norma EN 933-1 no caso dos agregados virgens, pelo procedimento de peneiração por via seca com lavagem, a granulometria do filer foi determinada através da norma EN 933-10, pelo método de peneiração por jato de ar e a granulometria da RA foi determinada pela norma EN 12697-2, após a extração do betume. Foram ainda avaliadas as características referentes à fração mais fina do agregado (material passado no peneiro de abertura 2 mm), nomeadamente a determinação do teor de finos pelo método do equivalente areia pela EN 933-8 e a avaliação dos finos pelo ensaio do azul de metileno segundo a EN 933-9.

Relativamente, à forma do agregado da fração grossa foram realizados os ensaios de índice de achatamento pela norma EN 933-3 e índice de alongamento pela norma BS 812-105.2:1990. A resistência à fragmentação do agregado grosso foi avaliada pelo método de Los Angeles pela norma EN1097-2.

A resistência ao desgaste do agregado grosso foi avaliada pelo método micro-Deval pela norma EN 1097-1. Foi ainda determinada a massa volúmica e a absorção de água dos agregados virgens pela norma EN 1097-6; para o fíler foi considerada a massa volúmica declarada na ficha técnica do produto.

A fração de RA utilizada no estudo foi avaliada relativamente à granulometria do material pétreo após extração de betume e forma do agregado grosso pelos métodos utilizados na caracterização do agregado virgem. Nesta fração foi, ainda, determinada a percentagem de betume envelhecido pela norma EN 12697-1, tendo o betume envelhecido sido recuperado com recurso a um evaporador rotativo pelo método indicado em EN 12697-3.

No betume recuperado foi avaliada a consistência para temperaturas intermédias de serviço (25 °C) segundo o procedimento indicado na norma EN 1426 e a consistência para temperaturas elevadas de serviço pela norma EN 1427, propriedades essas necessárias para a definição do tipo de betume virgem e da quantidade rejuvenescedor a utilizar.

Complementarmente aos materiais pétreos e RA, foram igualmente caracterizados os betumes virgens utilizados no presente estudo. Na Tabela 4 são apresentadas as características estudadas.

Tabela 4 - Caracterização dos betumes virgens.

Características	Referência normativa	PMB 45/80-65 (Elaster BM-3C)	PMB 45/80-65 (PMB Regener)
Penetração	EN 1426	▪	▪
Temperatura de amolecimento	EN 1427	▪	▪
Recuperação elástica	EN 13398	▪	▪
Força de ductilidade (tração baixa velocidade)	EN 13589	▪	▪
Resistência ao envelhecimento, RTFOT	EN 12607-1	▪	▪
Viscosidade dinâmica	EN 13302	▪	▪

De acordo com a Tabela 4, o betume foi avaliado relativamente à sua consistência para temperaturas intermédias de serviço através do ensaio de penetração (Figura 22) realizado de acordo com a EN 1426. Neste ensaio, um provete é colocado numa cápsula, que após arrefecimento é colocada num banho a 25 °C durante 60 a 90 min e medida a penetração de uma agulha a 25 °C aplicando uma carga de 100 g durante 5 s.

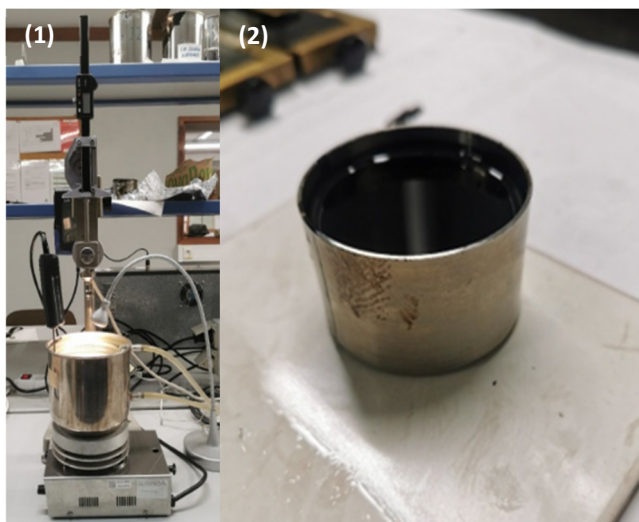


Figura 22 - Determinação da penetração com agulha.
(1)-Penetrómetro | (2)-Provete.

A consistência para temperaturas elevadas de serviço pelo método do anel e bola (Figura 23) foi avaliada segundo o procedimento indicado na EN 1427. Neste ensaio são moldados dois provetes de betume em forma de disco, em anéis de latão, cada um suportando uma esfera de aço, sendo aquecidos num banho líquido cuja temperatura vai sendo elevada a uma taxa controlada de 5 °C/min. A temperatura de amolecimento deve corresponder à média das temperaturas às quais os dois provetes amolecem o suficiente para permitirem que as respetivas esferas desçam, envoltas em betume, numa profundidade de $(25,0 \pm 0,4)$ mm.

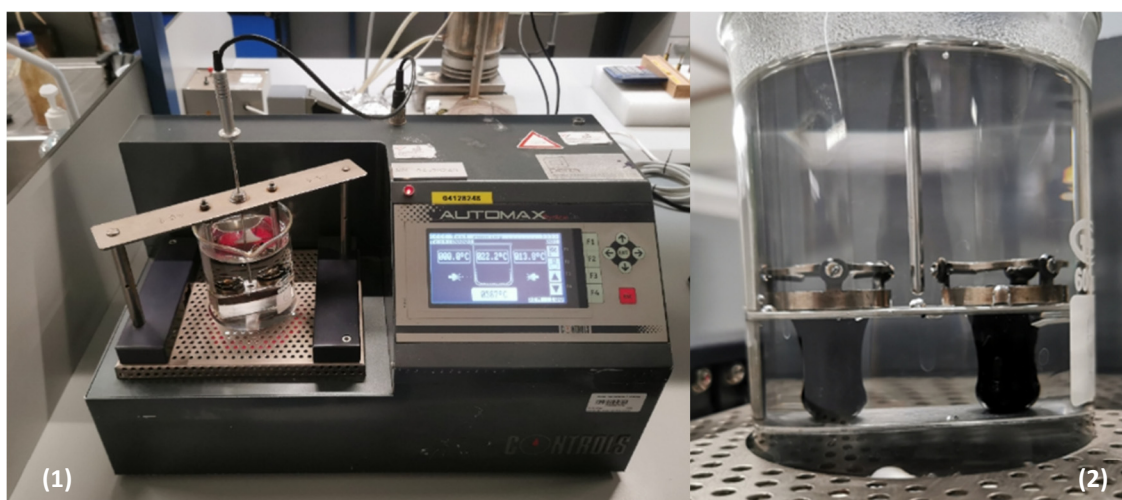


Figura 23 – Determinação da temperatura de amolecimento, método do anel e bola.
(1)- Equipamento automático | (2)-Amostra no final do ensaio.

As propriedades de coesão (Figura 24) foram avaliadas de acordo com a EN 13589. Neste ensaio três provetes moldados são alongados num ductilímetro às temperaturas de 5 °C, 10 °C e 15 °C, de acordo com as temperaturas especificadas na EN 14023 para enquadramento do betume na respetiva classe, a uma velocidade constante, até ocorrer uma rotura ou ser atingido um alongamento de pelo menos 1333 % (0,400 m). A coesão obtida no ensaio de força-ductilidade corresponde à diferença entre a energia de coesão obtida na rotura ou alongamento de 1333 % (0,400 m) e a energia de coesão para um alongamento de 667 % (0,200 m).



Figura 24 - Determinação da propriedade de tração de betumes modificados pelo método da força-ductilidade.

(1)-Ductilímetro | (2)-Moldagem do provete | (3)-Provetes durante o ensaio.

A recuperação elástica (Figura 25) foi avaliada pelo método descrito na EN 13398, neste ensaio dois provetes moldados são alongados à temperatura de 25 °C, de acordo com as temperaturas especificadas na EN 14023 para enquadramento do betume na respetiva classe, num ductilímetro a uma velocidade constante de 50 mm/min até um alongamento predefinido (0,200 m). O fio de betume assim produzido é cortado ao meio para se obter duas metades. Após 30 min de recuperação, o encurtamento dos meios-fios é medido e expresso como percentagem da extensão do alongamento.



Figura 25 - Determinação da recuperação elástica.

(1)-Provetes antes do alongamento | (2)-Provetes após o corte do fio do betume | (3)-Medição da recuperação do fio do betume.

Para medir a viscosidade do betume a temperaturas elevadas, a viscosidade dinâmica (Figura 26) para temperaturas elevadas (produção e aplicação) foi avaliada com recurso ao equipamento *Brookfield* pelo método EN 13302. O binário medido no *Spindle* a rodar numa amostra de betume com a temperatura controlada, é utilizado para medir a resistência relativa à rotação. O binário e a velocidade são utilizados para determinar a viscosidade dinâmica em Pascal segundo (Pa.s).



Figura 26 - Determinação da viscosidade dinâmica (*Brookfield*).

(1)-Pesagem dos provetes para ensaio | (2)-Viscosímetro rotacional.

O ensaio *Rolling Thin Film Oven Test* (RTFOT), tem como objetivo simular em laboratório o envelhecimento que a maior parte dos betumes sofre durante a fase de fabrico das misturas betuminosas. No presente estudo o ensaio RTFOT (Figura 27) foi realizado segundo a EN 12607-1.

Neste ensaio a película do betume é exposta a 163 °C durante 75 minutos sob um fluxo constante de ar. O resultado do ensaio RTFOT consiste na comparação das propriedades determinadas pelos ensaios de penetração com agulha, temperatura de amolecimento (método anel e bola) e perda de massa dos provetes antes e após as condições de condicionamento descritas anteriormente.



Figura 27 - Determinação da resistência ao envelhecimento sob a influência de temperatura e de um fluxo constante de ar, pelo método RTFOT.

(1)-Pesagem dos provetes para ensaio | (2)-Provetes na estufa/ ventilador tipo gaiola no início do ensaio | (3)-Recipientes de vidro com provetes no fim do ensaio.

Numa segunda fase, o programa experimental contemplou a avaliação de misturas betuminosas do tipo AC14 surf PMB 45/80-65 (BBr) com e sem a reutilização de 20 % de RA, cujos materiais pétreos e RA são provenientes de duas empreitadas na autoestrada A3, em sublanços distintos adjudicadas a dois empreiteiros [Gabriel Couto (M1) e Mota Engil (M2)].

Numa primeira instância foram fabricadas amostras de mistura betuminosa no laboratório da Brisa na Maia. Posteriormente, as misturas betuminosas estudadas em laboratório foram transpostas para trechos experimentais, realizados nas instalações de Brisa no Centro Operacional da Maia. Por fim, foram realizados três trechos piloto, dois trechos na A3-Águas Santas/Maia (empreiteiro Gabriel Couto) e um na A3-Braga Oeste/EN 201 (empreiteiro Mota Engil). A Figura 28 representa geograficamente os locais de execução para cada trecho piloto.

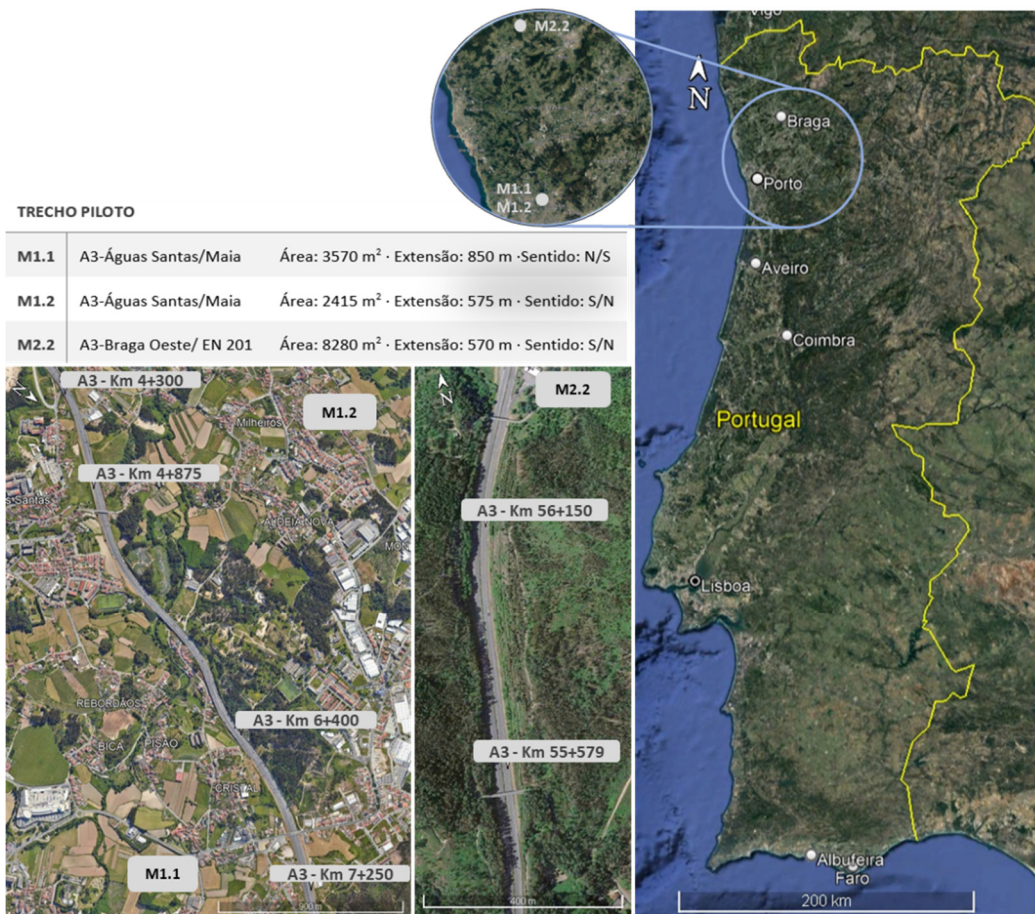


Figura 28 - Localização geográfica dos trechos piloto.

Das 11 misturas betuminosas avaliadas, cinco foram fabricadas em laboratório e as restantes seis foram produzidas em central de produção, três durante a execução dos trechos experimentais e as outras três durante a execução dos trechos piloto.

As cinco amostras produzidas em laboratório foram:

- Três misturas betuminosas fabricadas com os materiais provenientes do empreiteiro Gabriel Couto, uma mistura betuminosa de referência (M1-REF), uma mistura betuminosa com betume modificado PMB 45/80-65 com a introdução de fibras Viatop Plus RC (M1.1) e uma mistura betuminosa com betume modificado PMB 45/80-65 Regener (M1.2);
- Duas misturas betuminosas fabricadas com os materiais provenientes do empreiteiro Mota Engil, uma mistura betuminosa de referência (M2-REF) e uma mistura betuminosa com betume modificado PMB 45/80-65 Regener (M2.2).

As três misturas betuminosas produzidas em central de produção, foram recolhidas (na espalhadora da pavimentadora) aquando da execução dos trechos experimentais (TE):

- Duas misturas betuminosas provenientes da aplicação realizada pelo empreiteiro Gabriel Couto (M1.1-TE e M1.2-TE) e;
- Uma mistura betuminosa proveniente da aplicação realizada pelo empreiteiro Mota Engil (M2.2-TE).

Numa última fase, foram recolhidas amostras (na espalhadora da pavimentadora) de três misturas betuminosas produzidas em central de produção para execução dos trechos piloto (TP):

- Duas misturas betuminosas (M1.1-TP e M1.2-TP) provenientes da aplicação realizada pelo empreiteiro Gabriel Couto na A3-Águas Santas/Maia;
- Uma mistura betuminosa (M2.2-TP) provenientes da aplicação realizada pelo empreiteiro Mota Engil na A3-Braga Oeste/EN 201.

As misturas betuminosas estudadas foram avaliadas relativamente às suas propriedades gerais, comportamento mecânico e funcional de acordo com o sintetizado na Tabela 5.

Tabela 5 - Ensaios realizados para as misturas betuminosas.

	Avaliação realizada	Referência normativa	Amostras fabricadas/recolhidas						
			Laboratório			Trecho Experimental		Trecho Piloto	
			M1 - REF	M1.1	M1.2	M1.1 - TE	M1.2 - TE	M1.1 - TP	M1.2 - TP
			M2 - REF	M2.2		M2.2 - TE		M2.2 - TP	
Propriedades gerais da mistura betuminosa	Percentagem de betume	EN 12697-1	▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪
	Granulometria após extração do betume	EN 12697-2	▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪
	Baridade dos provetes	EN 12697-6	▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪
	Baridade máxima teórica	EN 12697-5	▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪
Comportamento mecânico	Ensaio Marshall	EN 12697-34	▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪
	Sensibilidade à água	EN 12697-12	▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪
	Ensaio de pista (<i>Wheel-tracking</i>)	EN 12697-22	▪	▪	▪	▪	▪		
	Fadiga (4PB-PR, 20°C, 10Hz, extensão controlada)	EN 12697-24	▪					▪	▪
	Módulo de deformabilidade (4PB-PR, 20°C, 1-30Hz, extensão controlada)	EN 12697-26	▪					▪	▪
Comportamento funcional	Profundidade média da macrotextura (método volumétrico)	EN 13036-1	▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪

Tal como exposto na Tabela 5 a percentagem de betume solúvel, foi determinada segundo a EN12697-1 pelo método de extração por centrifugação utilizando como solvente o tetracloroetileno com recuperação de finos utilizando uma centrifugadora de fluxo contínuo (Figura 29).



Figura 29 - Amostra após extração do betume solúvel em tetracloroetileno por centrifugação.

A distribuição granulométrica da mistura betuminosa após extração (Figura 30) do betume foi realizada de acordo com a norma EN 12697-2 por peneiração (série de peneiros de base+2).



Figura 30 - Aspeto da granulometria por peneiração após extração do betume.

No que concerne à baridade (Figura 31) e à baridade máxima teórica (Figura 32) dos provetes foram, respetivamente, determinadas pelo método B indicado na norma EN 12697-6 (provetes saturados com a superfície seca, SSD) e pelo método A da norma EN 12697-5 para uma temperatura de ensaio de 25 °C.

Posteriormente, as propriedades volumétricas da mistura betuminosa (porosidade, V_a ; vazios na mistura betuminosa de agregados, VMA e; volume de vazios preenchidos com betume, VFB) foram determinadas de acordo com a norma EN 12697-8.



Figura 31 - Baridade dos provetes.

(1)-Pesagem do provete seco ao ar | (2)-Provete húmido | (3)-Pesagem do provete submerso em água.



Figura 32 - Baridade máxima teórica dos provetes.

(1)-início da aplicação de vácuo à amostra submetida a ensaio | (2)-Picnómetro com amostra.

Relativamente ao comportamento mecânico o programa experimental contemplou a avaliação Marshall (Figura 33), para determinação da estabilidade (S), deformação (F) e quociente Marshall (Q) indicado na EN 12697-34, tendo as amostras sido previamente condicionadas num banho em água a temperatura constante de 60 °C durante 40 min.

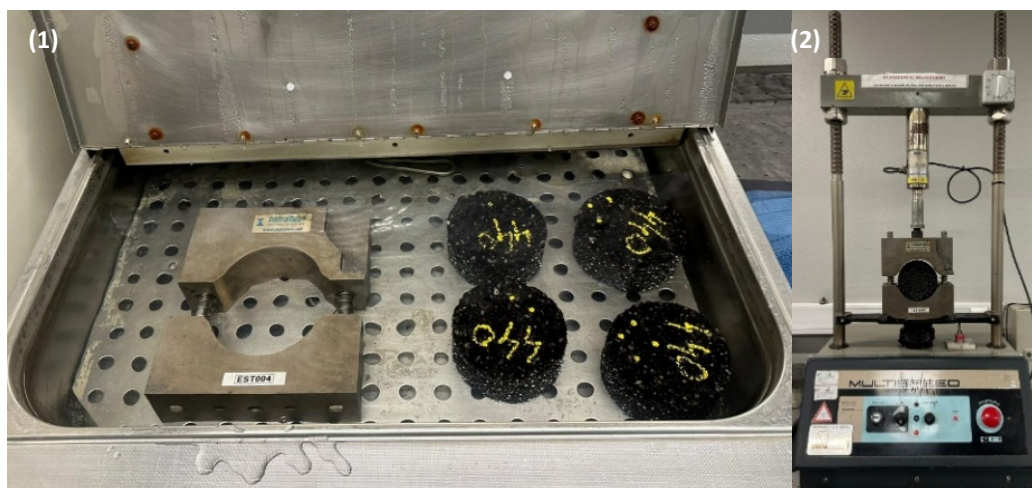


Figura 33 - Ensaio Marshall.

(1)-Provetes e estabilômetro no banho | (2)-Prensa Marshall durante o ensaio.

A avaliação da sensibilidade à água (Figura 34) foi realizada pelo método A da EN 12697-12. Este método utiliza a resistência à tração indireta de dois conjuntos de provetes cilíndricos compactados em laboratório (com 50 pancadas por face) que são submetidos a condições de condicionamento distintas, provetes secos com condicionamento a 15 ± 1 °C durante 2 horas e provetes húmidos, que numa primeira fase são colocados num picnómetro com água a 20 ± 5 °C e submetidos a vácuo ($6,7 \pm 0,3$ kPa) durante 30 ± 5 minutos sendo, posteriormente, colocados num banho de água a 40 ± 2 °C durante 72 ± 2 horas e finalmente colocados numa estufa a 15 ± 1 °C durante 2 horas. A determinação da resistência à tração indireta (ITS) em ambos os conjuntos de provetes é realizada de acordo com o estabelecido na EN 12697-23, sendo a resistência conservada em tração indireta, ITSR (%) determinada pelo quociente entre a resistência à tração indireta dos provetes húmidos (ITS_w) e a resistência à tração indireta dos provetes secos (ITS_s).



Figura 34 - Sensibilidade à água.

(1)-Prensa com dispositivo para tração indireta durante o ensaio | (2)-Aspeto do tipo de rotura observada nos provetes secos após ensaio | (3)-Aspeto do tipo de rotura observada nos provetes húmidos após ensaio.

A avaliação da suscetibilidade de uma mistura betuminosa a deformar sob a aplicação de uma carga foi realizada através do ensaio de pista, *Wheel-tracking*, (Figura 35) segundo a EN 12697-22. Este ensaio foi realizado a 60 °C (temperatura de ensaio adotada em Portugal e definida no anexo nacional da EN 13108-1), com uma carga de 700 N durante 10.000 ciclos após estágio a 60°C durante 300 minutos (lajes com 5 cm de espessura).

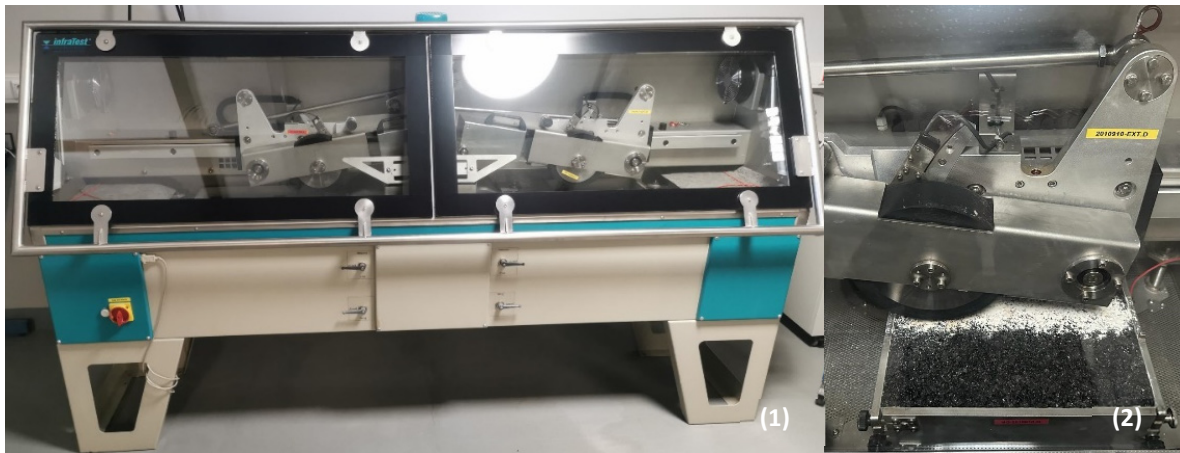


Figura 35 - Resistência à deformação permanente (*Wheel-tracking*).
(1)-Equipamento para o ensaio *Wheel-tracking* | (2)-Provete durante o ensaio.

A avaliação da resistência ao fendilhamento por fadiga (Figura 36) foi realizada segundo o Anexo D da EN 12697-24 (4PB-PR, 20 °C, 10 Hz extensão controlada) para três níveis de extensão 200, 300 e 400x10⁻⁶ m/m com o critério de rotura de 50 % do módulo inicial. O módulo de deformabilidade (Figura 36), foi determinado de acordo com a EN 12697-26 (Anexo B - ensaio de flexão em quatro pontos, 4PB-PR) a 20 °C para um nível de extensão de 50x10⁻⁶ m/m nas seguintes frequências 1, 3, 5, 10, 20 e 30 Hz.

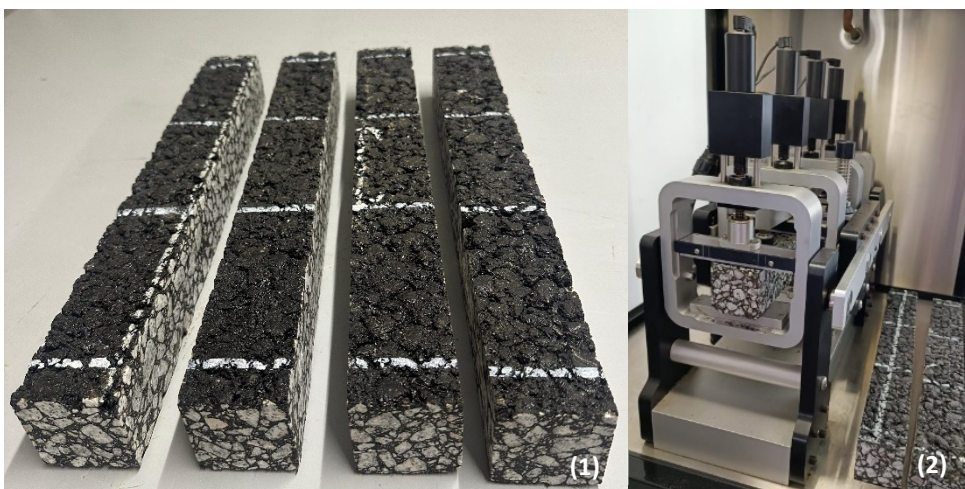


Figura 36 – Equipamento para avaliação da fadiga pelo método de ensaio de flexão a 4 pontos e módulo de deformabilidade.
(1)-Provetes para ensaio | (2)-Provete a ser ensaiado.

No que concerne ao tipo de compactação e provetes, para os ensaios Marshall e de ITSr foram utilizados provetes cilíndricos compactados em laboratório com um compactador de impacto, de acordo com a EN 12697-30 com uma energia de compactação de 50 pancadas por face. Para os ensaios de pista, módulo de deformabilidade e resistência ao fendilhamento por fadiga foram compactadas lajes com um cilindro de rolos de acordo com a EN 12697-33, sendo a compactação obtida em função da baridade máxima da mistura betuminosa e da porosidade expectável.

Complementarmente à avaliação do comportamento mecânico, o comportamento funcional da mistura betuminosa foi avaliado através do ensaio de profundidade média da macrotextura (Figura 37) da superfície do pavimento (método volumétrico da mancha) descrito na EN 13036-1. Este método consiste no espalhamento de um volume conhecido de material (esferas de vidro) sobre uma superfície seca e limpa do pavimento com a forma de uma mancha circular. A profundidade média da macrotextura é obtida dividindo o volume das esferas de vidro pela área coberta.



Figura 37 - Realização do ensaio para determinação da profundidade média da macrotextura em obra.

Adicionalmente, o programa experimental contemplou ainda a avaliação do comportamento do betume recuperado das misturas betuminosas com e sem reutilização de RA estudadas em laboratório e aplicadas nos trechos experimental e piloto, segundo o programa de ensaios descrito na Tabela 6.

Tabela 6 - Ensaios realizados para o betume recuperado.

Avaliação realizada	Referência normativa	Amostras fabricadas/recolhidas						
		Laboratório			Trecho Experimental		Trecho Piloto	
		M1 - REF	M1.1	M1.2	M1.1 - TE	M1.2 - TE	M1.1 - TP	M1.2 - TP
		M2 - REF	-	M2.2	M2.2 - TE	M2.2 ^A -TE	-	M2.2 - TP
Penetração	EN 1426	▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪
Temperatura de amolecimento	EN 1427	▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪
Recuperação elástica	EN 13398	▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪
Força de ductilidade (tração baixa velocidade)	EN 13589	▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪
Viscosidade dinâmica	EN 13302	▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪

A avaliação das propriedades referidas na Tabela 6 foi realizada no betume recuperado das misturas betuminosas pelo método EN 12697-3 utilizando um evaporador rotativo (Figura 38). Os métodos utilizados para a caracterização destes betumes foram os mesmos utilizados para a caracterização dos betumes virgens já descritos anteriormente na caracterização desses betumes.

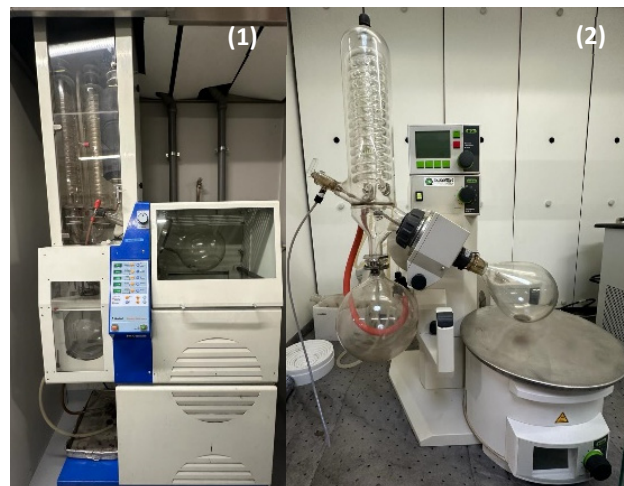


Figura 38 - Evaporador rotativo.

(1)-Equipamento para recuperação de betume em amostras de grande dimensão | (2)-Equipamento para recuperação de betume em amostras de pequena dimensão.

3.2. Materiais constituintes das misturas betuminosas

Para concretização do programa experimental foram utilizados diferentes materiais constituintes tais como, materiais pétreos (agregados e filler), misturas recuperadas (RA), betumes modificados e fibras para posterior fabrico das misturas betuminosas avaliadas no presente estudo. Estes materiais foram caracterizados de acordo com as metodologias apresentadas em 3.1, os resultados obtidos são seguidamente apresentados.

- **Agregados, fíler e RA**

Os agregados que seguidamente se descrevem foram utilizados nas misturas betuminosas M1.1, M1.2, M1.1-TE, M1.2-TE, M1.1-TP e M1.2-TP:

- Agregados das frações 10/16 mm e 4/12 mm de natureza granítica, provenientes da Pedreira da Agrepor, localizada em Penafiel;
- Agregado da fração 0/6 mm de natureza granítica, provenientes da Pedreira da Agrepor, localizada em Vila das Aves;
- Fíler comercial de origem calcária proveniente da Central de Ourém da Minerblanc, localizada em Fátima;
- RA da fração 8/16 mm (16 RA 0/10 mm, após extração do betume) de natureza granítica, proveniente da fresagem da camada de desgaste em mistura betuminosa drenante do tipo PA12,5 PMB 45/80-60 (BBd) da empreitada realizada na A3- Porto (VCI)/EN12/Águas Santas (A3/A4), com uma vida em serviço de 17 anos. O material fresado foi transformado fisicamente pela Gabriel Couto em central para obtenção da fração utilizada no presente estudo.

Os agregados que seguidamente se descrevem foram utilizados nas misturas betuminosas M2.2, M2.2-TE e M2.2-TP:

- Agregados de frações 10/14 mm, 4/10 mm e 0/4 mm de natureza granítica, provenientes da Pedreira de Moinho de Vento propriedade da Mota Engil, localizada em Vila Nova de Famalicão;
- Fíler comercial de origem calcária proveniente da Central de Ourém da Minerblanc, localizada em Fátima;
- RA da fração 8/16 mm (16 RA 0/10 mm, após extração do betume) de natureza granítica, proveniente da fresagem da camada de desgaste em mistura betuminosa drenante do tipo PA12,5 PMB 45/80-60 (BBd) da empreitada realizada na A3-Braga Oeste/EN201, com uma vida em serviço de 25 anos. O material fresado foi transformado fisicamente pela Mota Engil em central para obtenção da fração utilizada no presente estudo.

Os resultados das análises granulométricas dos materiais pétreos associados à empreitada da A3-Águas Santas/Maia (M1.1, M1.2, M1.1-TE, M1.2-TE, M1.1-TP e M1.2-TP) são apresentadas na Tabela 7 e na Figura 39.

Tabela 7 - Granulometria das frações de agregados virgens e RA utilizados nas misturas betuminosas M1.1, M1.2, M1.1-TE, M1.2-TE, M1.1-TP e M1.2-TP.

Abertura dos peneiros (mm) Série (Base+2)	Agregados virgens				Agregados recuperados
					
	10/16 mm Granito	4/12 mm Granito	0/6 mm Granito	Fíler Calcário	16 RA 0/10 mm Granito
20	100	100	100	100	100
16	97	100	100	100	100
14	82	100	100	100	100
12,5	55	100	100	100	99
10	16	87	100	100	88
8	6	61	100	100	60
6,3	4	30	99	100	31
4	3	8	88	100	18
2	2	3	66	100	16
1	2	2	47	100	14
0,500	2	1	31	100	12
0,250	1	1	19	100	10
0,125	1	1	12	99	8
0,063	0,7	0,7	7,4	82,0	5,4

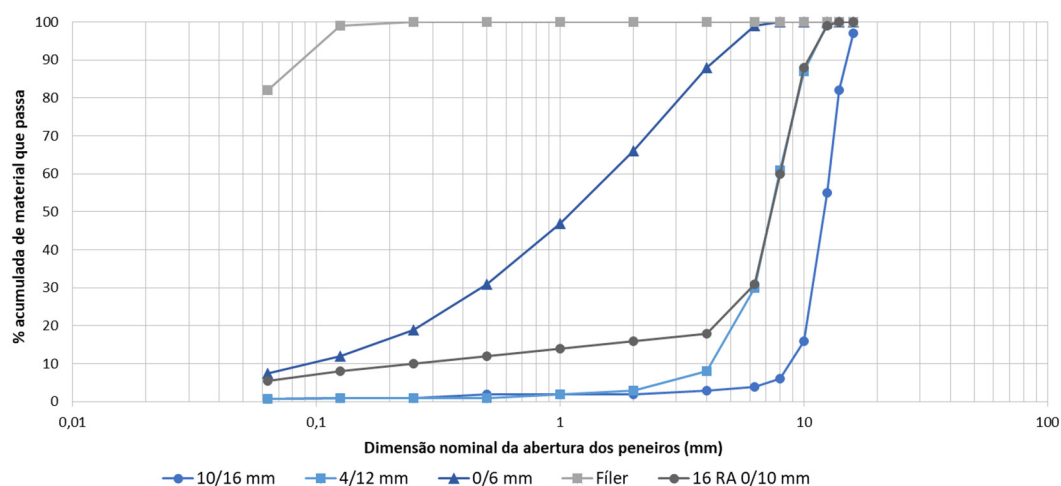


Figura 39 - Curvas granulométricas das frações de agregados, fíler e RA (M1.1, M1.2, M1.1-TE, M1.2-TE, M1.1-TP e M1.2-TP).



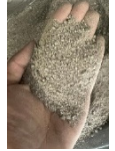


Na Tabela 8 são apresentadas as características dos agregados e da RA, tendo em consideração as especificações das Cláusulas Técnicas Especiais da Brisa (CTE-Brisa, 2023), para o fabrico das misturas AC14 Surf (BBr).

Tabela 8 - Características dos agregados e da RA para o fabrico das misturas AC14 Surf (BBr) de acordo com as especificações CTE-Brisa, 2023 (M1.1, M1.2, M1.1-TE, M1.2-TE, M1.1-TP e M1.2-TP).

Avaliação realizada	Referência Normativa	Requisitos AC 14 surf (BBr)	M1.1, M1.2, M1.1-TE, M1.2-TE, M1.1-TP e M1.2-TP				
			Fração 10/16 mm Granito	Fração 4/12 mm Granito	Fração 0/6 mm Granito	16 RA 0/10 mm Granito	
Granulometria dos agregados grossos ^a	%	EN 933-1	G _{c 90/10} ; G _{20/15} OU G _{25/15}	G _{c 90/20}	G _{c 90/15}	NA	- ^e
Granulometria dos agregados finos	%	EN 933-1	G _{r85} ; G _{r10}	NA	NA	G _{F85}	- ^e
Conteúdo de finos (f) dos agregados grossos	%	EN 933-1	f _{0,5}	1,1	1,0	NA	3,0
Equivalente de areia da fração 0/2 mm (SE)	%	EN 933-8	SE ₅₅	NA	NA	59	NA
Valor de Azul de Metileno da fração 0/2 mm	g/Kg	EN 933-9	MB ₂	NA	NA		NA
Forma do agregado grosso - Índice de Achatamento	%	EN 933-3	< 5	1	4	NA	3
Forma do agregado grosso - Índice de alongamento	%	BS 812:1990 (secção 105.2)	≤ 15%	15	13	NA	15
Resistência à fragmentação do agregado grosso, coeficiente de Los Angeles	%	EN 1097-2	LA ₂₀ LA ₂₅ (granitos)	27	-	NA	-
Resistência ao desgaste do agregado grosso, coeficiente de Micro-Deval	%	EN 1097-1	M _{DE15}	8	-	NA	-
Massa volúmica das partículas ^b	Mg/m ³	EN 1097-6	ρ _a	2,640	2,660	2,670	-
			ρ _{rd}	2,660	2,620	2,670	-
			ρ _{ssd}	2,650	2,640	2,670	-
Absorção de água ^c	%	EN 1097-6	≤ 1%	0,3	0,5	0,1	-
Afinidade agregado/betume - Método da garrafa rotativa ^d	%	EN 12697-11-Parte A	≥ 80%	-	70	NA	NA
Resistência ao polimento	%	EN 1097-8	PSV ≥ 54	-	-	NA	-
OBSERVAÇÕES:	^a A categoria relativa ao peneiro intermédio deverá ser controlada nos agregados grossos caso D/d ≥ 2. ^b Declarar para cada uma das frações (0,063/4; 4/31,5 e > 31,5) os respetivos valores de "ρ _a - massa volúmica do material impermeável das partículas", de "ρ _{rd} - massa volúmica das partículas secas em estufa" e de "ρ _{ssd} - massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca". ^c Declarar para cada uma das frações (0,063/4; 4/31,5 e > 31,5) os respetivos valores de absorção de água WA24. ^d O tipo de betume a utilizar no ensaio deverá ser o mesmo da mistura betuminosa. ^e Foram apresentadas as granulometrias dos agregados sem classificação em categorias. NA-Não aplicável.						

No que concerne aos materiais pétreos associados à empreitada na A3 - Braga Oeste/EN 201 (M2.2, M2.2-TE e M2.2-TP), é apresentada a respetiva análise granulométrica na Tabela 9 e na Figura 40.

Tabela 9 - Granulometria das frações de agregados, fíler e RA utilizadas no estudo nas misturas M2.2, M2.2-TE e M2.2-TP.

M2.2, M2.2-TE e M2.2-TP					
Abertura dos peneiros (mm) Série (Base+2)	Agregados virgens				Agregados recuperados
					
	10/14 mm Granito	4/10 mm Granito	0/4 mm Granito	Fíler Calcário	16 RA 0/10 mm Granito
20	100	100	100	100	100
16	100	100	100	100	100
14	90	100	100	100	100
12,5	61	99	100	100	98
10	11	90	100	100	82
8	3	65	100	100	59
6,3	2	37	100	100	36
4	2	5	98	100	21
2	2	2	76	100	16
1	2	2	54	100	14
0,500	2	2	38	100	12
0,250	2	2	24	100	9
0,125	1	2	15	99	6
0,063	1,0	1,0	9,1	82,0	3,6

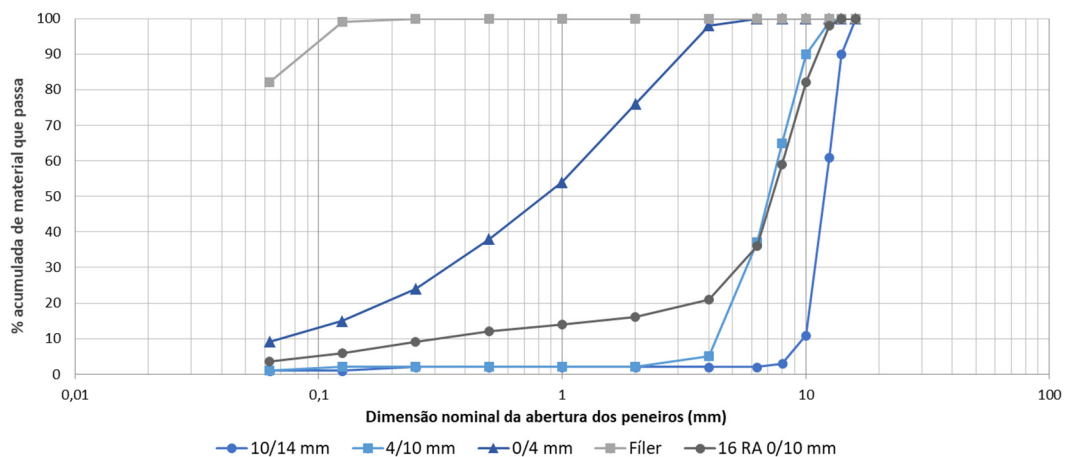


Figura 40 - Curvas granulométricas das frações de agregados, fíler e RA utilizadas no estudo da (M2.2, M2.2-TE e M2.2-TP).

Os valores apresentados na Tabela 10 correspondem, às características dos agregados virgens e da RA de acordo com as especificações das Cláusulas Técnicas Especiais da Brisa (CTE-Brisa, 2022), para o fabrico das misturas AC14 Surf (BBr).

Tabela 10 - Características dos agregados e da RA para o fabrico das misturas AC14 Surf (BBr) de acordo com as especificações CTE-Brisa, 2022 (M2.2, M2.2-TE e M2.2-TP).

Avaliação realizada	Referência Normativa	Requisitos AC 14 surf (BBr)	M2.2, M2.2-TE e M2.2-TP				
			Fração 10/14 mm Granito	Fração 4/10 mm Granito	Fração 0/4 mm Granito	16 RA 0/10 mm Granito	
Granulometria dos agregados grossos ^a	%	EN 933-1	G _{c-90/10} ; G _{20/15} ou G _{25/15}	- ^e	- ^e	NA	-
Granulometria dos agregados finos	%	EN 933-1	G _{r85} ; G _{TC10}	NA	NA	ND ^e	-
Conteúdo de finos (f) dos agregados grossos	%	EN 933-1	f _{0,5}	0,8	0,9	NA	-
Equivalente de areia da fração 0/2 mm (SE)	%	EN 933-8	SE ₅₅	NA	NA	49	-
Valor de Azul de Metileno da fração 0/2 mm	g/Kg	EN 933-9	MB ₂	NA	NA	3	-
Forma do agregado grosso - Índice de Achatamento	%	EN 933-3	< 5	2	6	NA	4
Forma do agregado grosso - Índice de alongamento	%	BS 812:1990 (secção 105.2)	≤ 15%	13	14	NA	14
Resistência à fragmentação do agregado grosso, coeficiente de Los Angeles	%	EN 1097-2	LA ₂₀ LA ₂₅ (granitos)	24	-	NA	-
Resistência ao desgaste do agregado grosso, coeficiente de Micro-Deval	%	EN 1097-1	M _D ≤15	11	-	NA	-
Massa volúmica das partículas ^b	Mg/m ³	EN 1097-6	pa	2,690	2,690	2,700	-
			prd	2,650	2,650	2,670	-
			pssd	2,660	2,660	2,680	-
Absorção de água ^c	%	EN 1097-6	≤ 1%	0,5	0,6	0,3	-
Afinidade agregado/betume - Método da garrafa rotativa ^d	%	EN 12697-11-Parte A	≥ 80%	85	-	NA	NA
Resistência ao polimento	%	EN 1097-8	PSV ≥ 54	54 (fração 6/14 mm)		NA	-
OBSERVAÇÕES:	^a A categoria relativa ao peneiro intermédio deverá ser controlada nos agregados grossos caso D/d ≥ 2. ^b Declarar para cada uma das frações (0,063/4; 4/31,5 e > 31,5) os respetivos valores de "pa - massa volúmica do material impermeável das partículas", de "prd - massa volúmica das partículas secas em estufa" e de "pssd - massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca". ^c Declarar para cada uma das frações (0,063/4; 4/31,5 e > 31,5) os respetivos valores de absorção de água WA24. ^d O tipo de betume a utilizar no ensaio deverá ser o mesmo da mistura betuminosa. ^e Foram apresentadas as granulometrias dos agregados sem classificação em categorias. NA-Não Aplicável ND-Não Determinado						

- **Betume**

No presente estudo foram considerados dois tipos de betumes modificados com polímeros (PMB), um betume PMB 45/80-65 (Elaster BM-3C) e um betume PMB 45/80-65 (PMB Regener). Os betumes utilizados são provenientes das instalações da Cepsa Matosinhos e Cepsa Madrid, respetivamente. Na Tabela 11 estão indicados os valores obtidos em laboratório para as propriedades de cada betume e os respetivos requisitos impostos pelo caderno de encargos da Brisa, bem como valores relativos a algumas das propriedades do betume proveniente da RA. No betume PMB 45/80-65 o caderno de encargos da Brisa especifica para cada propriedade a classe que o betume tem de cumprir de acordo com a EN 14023. Para o PMB 45/80-65 Regener os valores limites são os estabelecidos na ficha técnica do produto, uma vez que este produto não se encontra nos materiais especificados no caderno de encargos.

Tabela 11 – Propriedades dos betumes utilizados.

Propriedades		Referência normativa	Requisitos PMB 45/80-65	Betumes		Betume presente na RA		
				PMB 45/80-65 Elaster BM-3C	PMB 45/80-65 Regener	RA da M1	RA da M2	
Penetração a 25°C	0,1 mm	EN 1426	45-80 Classe 4	49	62	7	5	
Temperatura de amolecimento	°C	EN 1427	≥ 65 Classe 5	68	70	87	96	
Energia de coesão	5°C	J/cm ²	EN 13589	≥ 3 Classe 2	2,6 ^a	7,0	-	-
	10°C	J/cm ²	EN 13589	-	4,5 ^a	2,8	-	-
	15°C	J/cm ²	EN 13589	-	2,3	1,7	-	-
Recuperação elástica a 25°C	%	EN 13398	≥ 70 Classe 3	87,3	93,5	-	-	
Temperatura de fragilidade Fraass	°C	EN 12593	≤ -15 Classe 7	≤ -15 ^b	≤ -15 ^b	-	-	
Durabilidade, Resistência ao envelhecimento, (RTFOT) a 163°C	Penetração retida, 25°C	%	EN 12607-1	≥ 60 Classe 7	74,2	76,3	-	-
	Aumento da temperatura de amolecimento	°C		≤ 10 Classe 3	6,8	-3,2	-	-
	Variação de massa, máxima	%		≤ 1 Classe 5	0,3	0,1	-	-
Temperatura de inflamação	°C	EN ISO 2592	≥ 235 Classe 3	≥ 235 ^b	≥ 235 ^b	-	-	
Betume presente na fração 16 RA 0/10 mm	%	EN 12697-1	-	-	-	3,4	3,4	
OBSERVAÇÕES:	^a Não cumpre o critério da energia de coesão ($E^*s = E^*400 - E^*200$) de acordo com o Anexo A da EN 13589. Os provetes partiram antes de atingirem 400 mm de alongamento. ^b Desempenho declarado pelo fornecedor de betume.							

Na Tabela 11 é possível observar que o betume PMB 45/80-65 Regener embora enquadrado nas mesmas classes do betume PMB 45/80-65, possui características distintas especificamente preparadas para possibilitar a reutilização da RA, cuja composição tem betume envelhecido que se apresenta duro e frágil, conforme De acordo com os resultados o PMB 45/80-65 Regener tende a ser mais mole e apresentar uma maior elasticidade traduzida por uma maior energia de coesão a 5 °C (Figura 41) e recuperação elástica (Figura 51) comparativamente ao betume PMB 45/80-65.

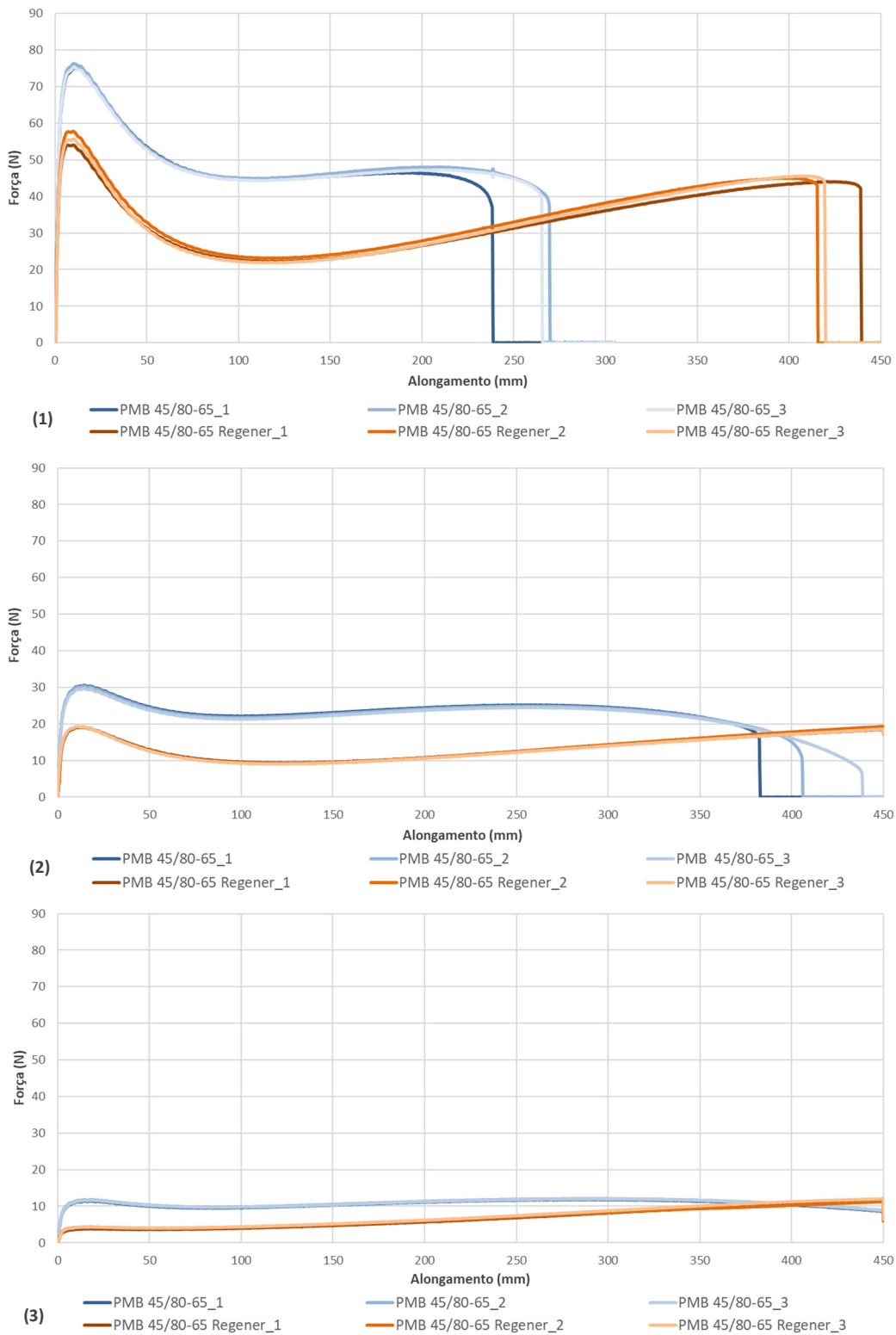



Figura 41 - Energia de coesão (PMB 45/80-65 e PMB 45/80-65 Regener).
 (1)-Energia de coesão 5 °C | (2)-Energia de coesão 10 °C | (3)-Energia de coesão 15 °C.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 41 é possível observar um primeiro ponto de rotura dos betumes mais alto para o PMB 45/80-65 decorrente de uma maior rigidez, a qual condiciona o comportamento do betume com o incremento do alongamento, observando-se uma inversão da força necessária para romper totalmente o provete no caso do PMB 45/80-65 Regener (para as diferentes temperaturas de ensaio) resultado de uma maior coesão e elasticidade do betume.

- **Aditivos**

No presente estudo foram utilizados dois aditivos com funções rejuvenescedoras, um rejuvenescedor adicionado em central pelo fornecedor do betume (Cepsa) ao PMB 45/80-65 Regener e um aditivo em forma de *pellets* composto por fibras celulósicas e rejuvenescedor (VIATOP Plus RC, fornecido pela JRS) para adição ao betume modificado PMB 45/80-65. Na Tabela 12 são apresentadas as características das fibras Viatop Plus RC.

Tabela 12 - Características do aditivo rejuvenescedor (fibras).

Avaliação realizada		Referência normativa	VIATOP plus RC	
Aspeto visual		-	<i>Pellets</i> cilíndricas cinzentas	
Percentagem de fibras celulósicas ^a	%	-	50	
Percentagem de rejuvenescedor ^b	%	-	50	
Comprimento médio das <i>pellets</i>	mm	-	3-15	
Espessura média das <i>pellets</i>	mm	-	3-5	
Baridade	Mg/m ³	DIN EN ISO 60	0,400-0,500	
Percentagem de material ≤ 3,55 mm	%	Método de peneiração	8	
OBSERVAÇÕES:	^a Fibra celulósica - do tipo ARBOCEL ZZ 8-1 ^c Características físicas do rejuvenescedor - branco e sólido			

3.3. Formulação das misturas betuminosas

O presente estudo foi realizado com base em misturas de referência sem reutilização de RA (M1-REF e M2-REF) formuladas pelo método Marshall pelas empresas adjudicatárias das respetivas empreitadas, previamente propostas e aprovadas pela Brisa no âmbito das respetivas empreitadas.

Com o objetivo de avaliar o impacte da influência da substituição de 20 % de agregados virgens por RA foi adotada a metodologia descrita de seguida para a formulação das misturas com RA a fabricar em laboratório:

- Determinação da curva granulométrica do material processado por crivagem e separação nos crivos 8/16 mm nos centros de produção das empreitadas;
- Caracterização da granulometria da RA antes e após extração do betume;
- Determinação da percentagem de betume presente na RA e respetiva penetração e temperatura de amolecimento para definição do tipo e quantidade de rejuvenescedor a adicionar às misturas betuminosas de acordo com a indicação dos fornecedores dos rejuvenescedores (Cepsa e JRS);
- Ajuste da composição da mistura betuminosa de referência face à reutilização de 20 % de agregado recuperado presente na RA, com o objetivo de obter uma curva granulométrica o mais similar possível da curva granulométrica da mistura betuminosa de referência (Figura 42);
- A quantidade de betume existente na RA foi considerada como ligante na nova mistura, pelo que à quantidade de betume virgem foi subtraído o betume existente na RA;
- Fabrico das misturas betuminosas com e sem reutilização de RA de acordo com o procedimento indicado na EN 12697-35, sendo a sequência de introdução de materiais na misturadora, tempos de mistura e temperaturas utilizadas para o aquecimento dos materiais apresentados na Figura 43;
- Nas misturas fabricadas em laboratório foram realizados os ensaios para a determinação das propriedades descritas na Tabela 5, nomeadamente, a determinação das características volumétricas, a sensibilidade à água e a resistência à deformação permanente, ao fendilhamento por fadiga, módulo de deformabilidade e macrotextura;
- Avaliação dos resultados;
- Com base na avaliação dos resultados, concluindo-se que as composições com reutilização de RA cumpriam os requisitos estabelecidos nas especificações dos cadernos de encargos das empreitadas, foi decidido efetuar os trechos experimentais;
- Com base nos resultados obtidos nos trechos experimentais, foi decidido avançar para os trechos piloto em autoestrada.

Na Tabela 13 são apresentadas as composições granulométricas das misturas de agregados definidas para as misturas betuminosas AC 14 surf (BBr) (M1-REF, M1.1|M1.2, M2-REF e M2.2) e respetivo fuso granulométrico. Para avaliar o impacte da reutilização de RA no desempenho das misturas betuminosas, as curvas granulométricas das misturas (M1-REF, M1.1|M1.2 e M2-REF,

M2.2) foram definidas para assegurar um desenvolvimento similar e com isso mitigar a influência associada a diferentes esqueletos minerais (Figura 42).

Tabela 13 - Fuso e composições granulométricas das misturas de agregados definidas (M1-REF, M1.1|M1.2, M2-REF, e M2.2).

Abertura dos peneiros (mm) Série (Base+2)	Percentagem acumulada de material que passa no peneiro (%)				
	Fuso Granulométrico AC 14 Surf (BBr)	M1-REF	M1.1 M1.2	M2-REF	M2.2
20	100	100	100	100	100
16	100	99	99	100	100
14	90-100	93	95	96	96
12,5	70-90	83	86	86	85
10	62-78	65	70	65	62
8	-	54	56	53	51
6,3	-	44	43	43	42
4	28-39	34	33	31	33
2	22-30	26	26	24	27
1	17-25	20	21	19	21
0,500	12-20	15	16	15	17
0,250	-	11	12	11	13
0,125	-	9	10	9	10
0,063	6,0-10,0	6,7	7,4	6,3	7,4

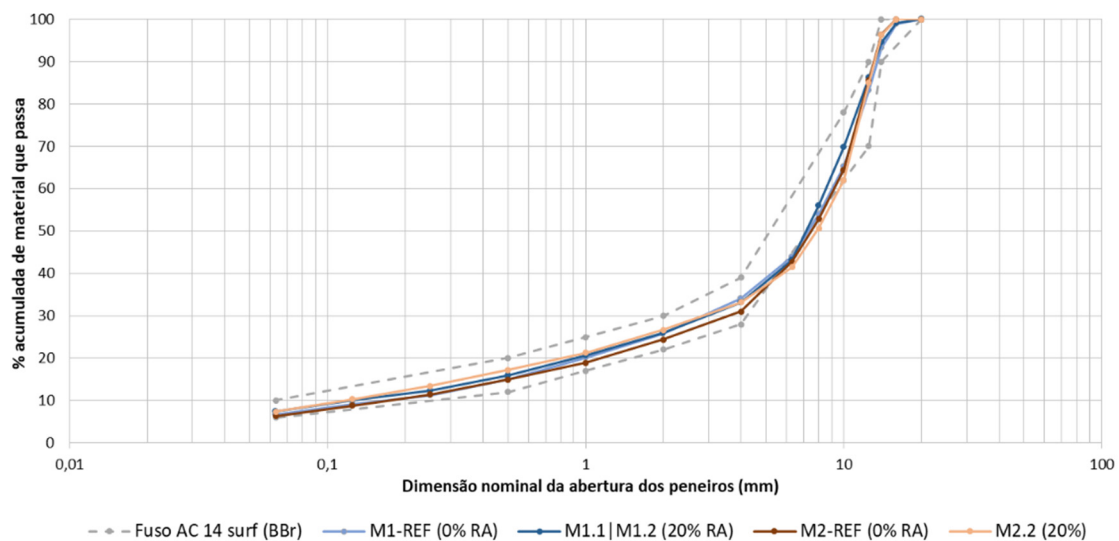


Figura 42 - Fuso granulométrico e curvas granulométricas das misturas betuminosas de agregados utilizadas nas misturas betuminosas (M1-REF, M1.1|M1.2, M2-REF, e M2.2).

Conforme o estudo de formulação realizado e descrito anteriormente, foram definidas as fórmulas de trabalho para as misturas betuminosas realizadas em laboratório.

Na Tabela 14 apresentam-se as composições ponderais das misturas betuminosas M1-REF, M1.1, M1.2, M2-REF e M2.2, tendo os materiais sido sequencialmente adicionados em laboratório segundo o apresentado na Figura 43.

Tabela 14 - Fórmulas de trabalho utilizadas no laboratório.

A3-Águas Santas/Maia				A3 - Braga Oeste/EN 201		
Material constituinte	M1-REF	M1.1	M1.2	Material constituinte	M2-REF	M2.2
10/16 mm	35,1%	35,2%	35,2%	10/14 mm	34,2%	24,7%
4/12 mm	27,6%	14,3%	14,3%	4/10 mm	33,2%	28,5%
0/6 mm	27,6%	21,9%	21,9%	0/4 mm	23,8%	18,0%
Fíler comercial	4,7%	4,8%	4,8%	Fíler comercial	3,8%	4,8%
16 RA 0/10 mm	-	19,0%	19,0%	16 RA 0/10 mm	-	19,0%
Betume virgem	5,0%	4,3%	4,3%	Betume virgem	5,0%	4,5%
Betume presente na RA	-	0,7%	0,7%	Betume presente na RA	-	0,5%
Fibras	-	1,5%	-	Fibras	-	-
Total	100%	101,5%	100%	Total	100%	100%

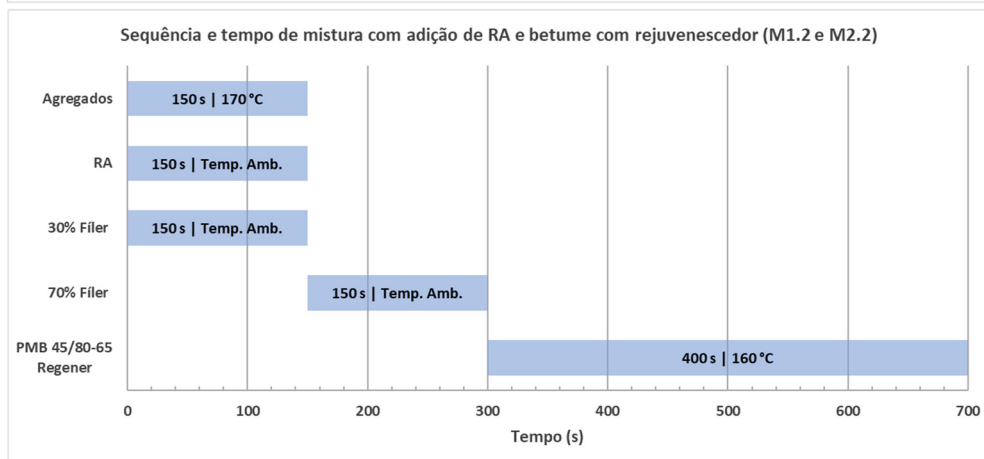
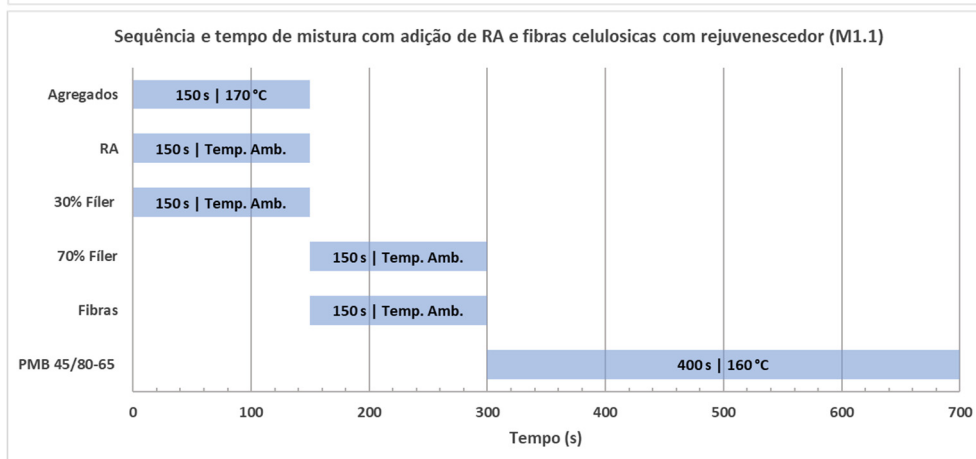
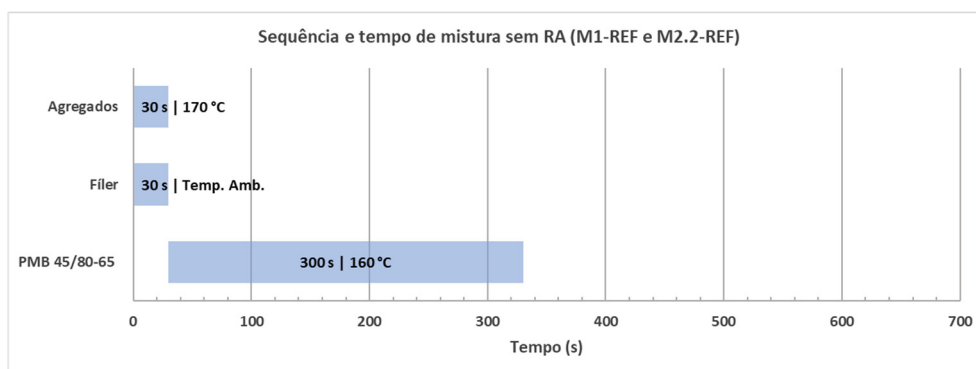


Figura 43 - Sequência, tempo e temperatura de mistura para as misturas betuminosas fabricadas em laboratório.

3.4. Fabrico e aplicação nos trechos experimentais e piloto

Após a validação da transposição dos estudos laboratoriais (Tabela 14) para a central de produção de misturas betuminosas descontínua (Figura 44), no qual a RA é introduzida à temperatura ambiente, o Caderno de Encargos da Brisa obriga a que se efetue um trecho experimental fora da autoestrada para validação dos seguintes aspetos: (i) meios de espalhamento e compactação; (ii) tempos de transporte; (iii) temperaturas de compactação; (iv) uniformidade na produção e (v) avaliação das características mecânicas e funcionais da mistura betuminosa compactada. Os trechos experimentais das misturas betuminosas estudadas foram realizados junto ao Centro Operacional da Brisa na Maia que reunia as condições para simular os tempos de transporte das misturas betuminosas das centrais de produção para os locais onde estava previsto realizar-se os trechos piloto na autoestrada.

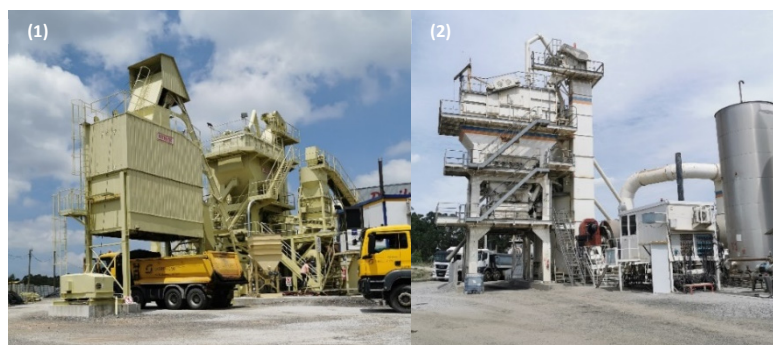


Figura 44 - Centrais de produção utilizadas para as misturas betuminosas.
(1)-M1.1-TE, M1.2-TE, M1.1-TP e M1.2-TP | (2)-M2.2-TE e M2.2-TP.

Na Figura 45 são apresentados os tempos de mistura e temperaturas utilizadas para o aquecimento dos materiais utilizados no fabrico das misturas betuminosas com reutilização de RA em trechos experimentais e trechos piloto.

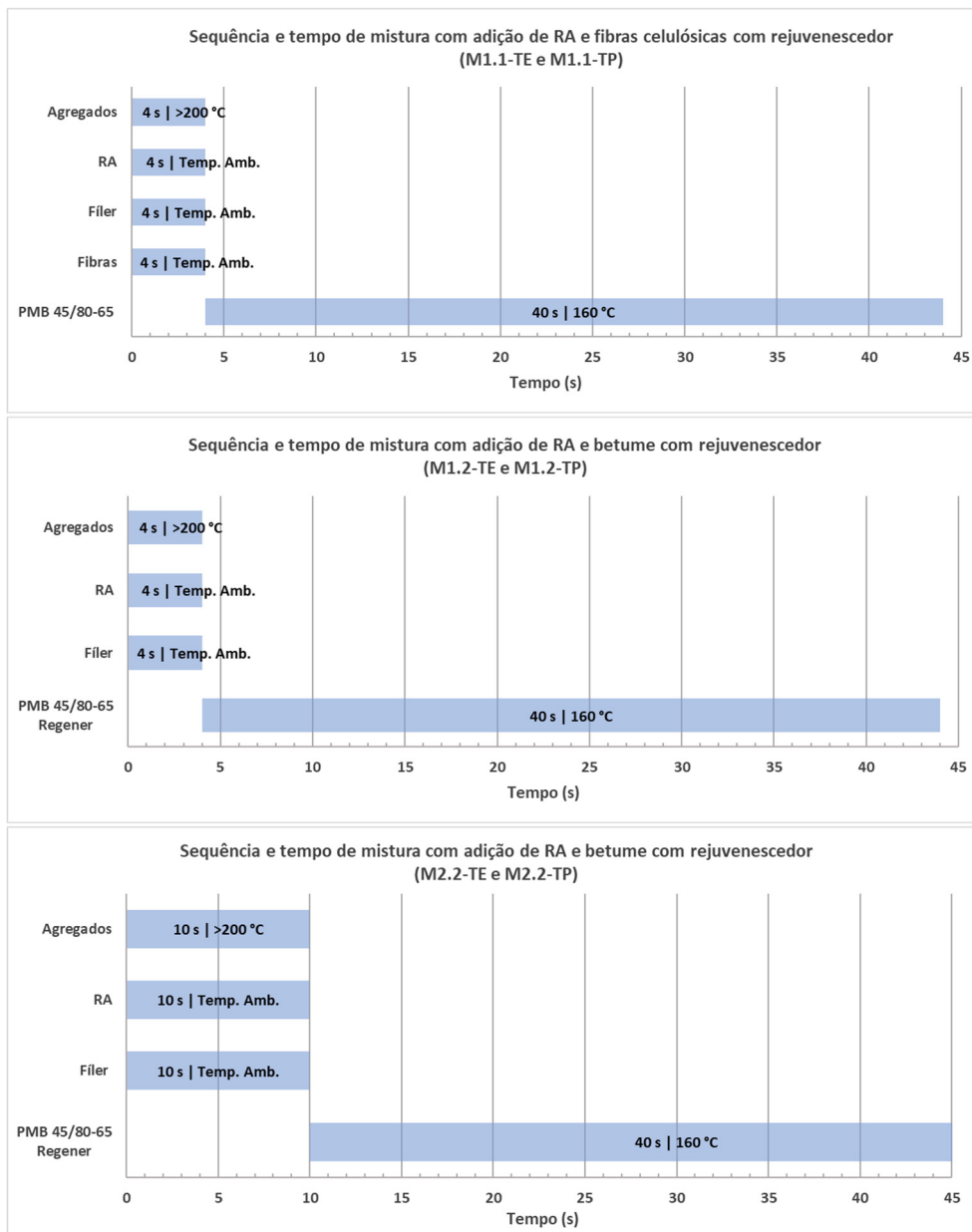


Figura 45 - Sequência, tempo e temperatura de mistura para as misturas betuminosas fabricadas em trechos experimentais e trechos piloto.

Para as misturas betuminosas produzidas para aplicação nos trechos experimentais (Figura 46) foram efetuadas recolhas de amostras para a repetição do programa experimental realizado previamente em laboratório, tendo sido, adicionalmente, avaliada a macrotextura do pavimento pelo método volumétrico (Figura 47).



Figura 46 - Aplicação da mistura betuminosa nos trechos experimentais.



Figura 47 - Avaliação da macrotextura pelo método volumétrico.

Avaliados os resultados dos ensaios obtidos nos trechos experimentais verificou-se uma adequada transposição da formulação da mistura betuminosa realizada em laboratório assim como a conformidade dos resultados obtidos com o especificado nas (CTE-Brisa, 2022; CTE-Brisa, 2023) tendo-se considerado que estavam reunidas as condições para a realização dos trechos piloto em ambiente de autoestrada (Figura 48). No processo de fabrico das misturas, tendo em conta o tipo de central utilizada e a metodologia de introdução da RA (diretamente no misturador à temperatura ambiente), a temperatura da mistura foi assegurada por um sobreaquecimento dos agregados virgens. Na M1.1-TP e M1.2-TP as temperaturas dos agregados variaram entre os 200 °C e os 240 °C, tendo-se observado pontualmente temperaturas superiores. Quanto à M2.2-TP, observaram-se temperaturas compreendidas entre os 200 °C e os 210 °C. À saída da central registou-se a temperatura da mistura de 175 °C a 180 °C em ambas as secções, e a compactação das misturas foi realizada a temperaturas entre 155 °C e 160 °C. O espalhamento e compactação foram efetuados de forma convencional, com recurso a uma espalhadora e cilindro de rolo por se tratar de uma camada de desgaste em mistura betuminosa descontínua com 5 cm de espessura.



Figura 48 - Aplicação nos trechos piloto.
(1)-M1.1-TP e M1.2-TP | (2)-M2.2-TP.

A realização dos trechos piloto decorreram de acordo com o planeamento das empreitadas em que foram incorporados (projetos de beneficiação das camadas de desgaste). Assim, relativamente aos trechos experimentais, regista-se como diferença o facto dos trechos piloto terem sido realizados em horário noturno dado os condicionamentos impostos nas empreitadas.

Para as misturas betuminosas produzidas e aplicadas nestes trechos piloto repetiram-se os ensaios realizados nos trechos experimentais. Adicionalmente foram compactadas lajes em laboratório com a mistura betuminosa recolhida em obra, que posteriormente foram enviadas para um laboratório externo (Instituto Superior Técnico - IST) para realização dos ensaios de determinação do módulo de deformabilidade e resistência ao fendilhamento por fadiga.

Por questões de logística e uniformidade (distância entre as centrais de produção e o laboratório), as lajes compactadas para posterior realização dos ensaios de avaliação do módulo de deformabilidade e resistência ao fendilhamento por fadiga tiveram de ser compactadas após reaquecimento na estufa em laboratório. Sabendo que este, não era o procedimento mais adequado para a preparação destas amostras, uma vez que induz o envelhecimento prévio às misturas betuminosas, foi, no entanto, assim realizado pois pretendia-se que a avaliação destes parâmetros fosse efetuada para as misturas betuminosas preparadas nas mesmas condições e também produzidas em ambiente industrial.

[página propositadamente em branco]

Capítulo IV

Apresentação, análise e discussão de resultados do caso de estudo

[página propositadamente em branco]

4. Apresentação, análise e discussão de resultados do caso de estudo

4.1. Influência da RA e dos diferentes aditivos rejuvenescedores nas características dos betumes recuperados das misturas betuminosas

A adição de rejuvenescedores no fabrico das misturas betuminosas com reutilização de RA pretende mitigar o efeito do betume envelhecido presente na RA, de modo que o ligante final constituído por betume virgem mais betume envelhecido apresente um comportamento semelhante ou melhorado relativamente ao betume virgem (PMB 45/80-65).

Para avaliar a influência dos aditivos rejuvenescedores nas características dos betumes, procedeu-se à sua recuperação das misturas betuminosas fabricadas em laboratório, assim como das misturas betuminosas recolhidas nos trechos experimentais e nos trechos piloto, comparativamente com as características do betume virgem antes e após o ensaio de envelhecimento RTFOT para as propriedades de penetração e temperatura de amolecimento. Na análise da influência foram ainda comparados os valores de recuperação elástica e da viscosidade dinâmica dos betumes recuperados das misturas betuminosas com os dos betumes virgens utilizados.

4.1.1. Penetração

Na Figura 49 são apresentados os resultados de penetração obtidos no betume recuperado de cada mistura betuminosa, comparativamente ao betume virgem de referência sem envelhecimento (REF, PMB 45/80-65) e após envelhecido com o RTFOT (REF-RTFOT, PMB 45/80-65).

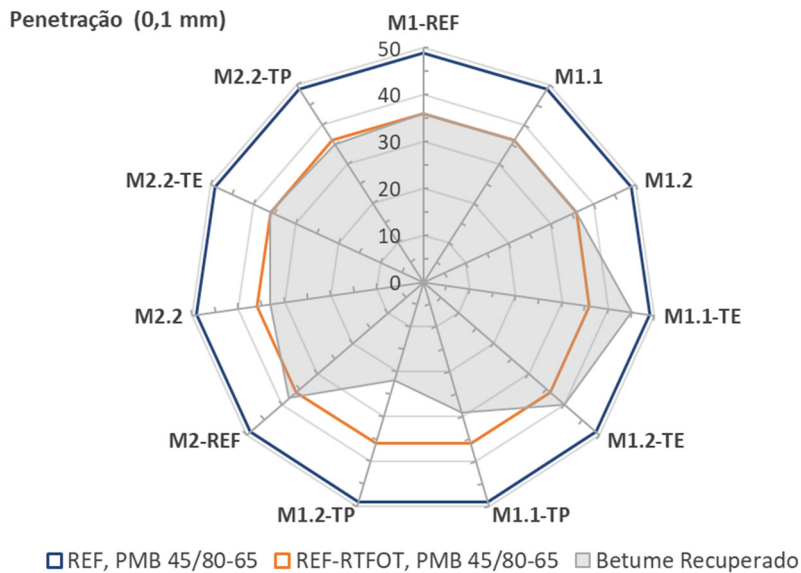


Figura 49 - Penetração dos betumes utilizados.

De acordo com Figura 49, e como expectável, observa-se uma diminuição da penetração do betume recuperado das misturas betuminosas com e sem reutilização de RA relativamente ao valor obtido na caracterização do betume virgem. Essa diminuição tende a ser semelhante à observada para o betume envelhecido através do ensaio RTFOT, independentemente do fabrico em laboratório ou em central. Verifica-se que o betume recuperado das misturas betuminosas M1.1-TP e M1.2-TP (trechos piloto) apresentam valores de penetração inferiores relativamente aos restantes o que poderá indiciar um excesso de envelhecimento durante o processo de fabrico em central. Os resultados da penetração observados na generalidade evidenciam que a utilização dos aditivos rejuvenescedores permite que o betume recuperado das misturas betuminosas com 20 % de RA não se apresente excessivamente endurecido e conseqüentemente propenso ao envelhecimento precoce, uma vez que os resultados de penetração obtidos são semelhantes aos obtidos no betume após envelhecimento RTFOT.

4.1.2. Temperatura de amolecimento

Na Figura 50 são apresentados os resultados da temperatura de amolecimento do betume recuperado de cada mistura betuminosa, comparativamente ao betume virgem (REF, PMB 45/80-65) e ao envelhecido através do RTFOT (RTFOT, PMB 45/80-65).

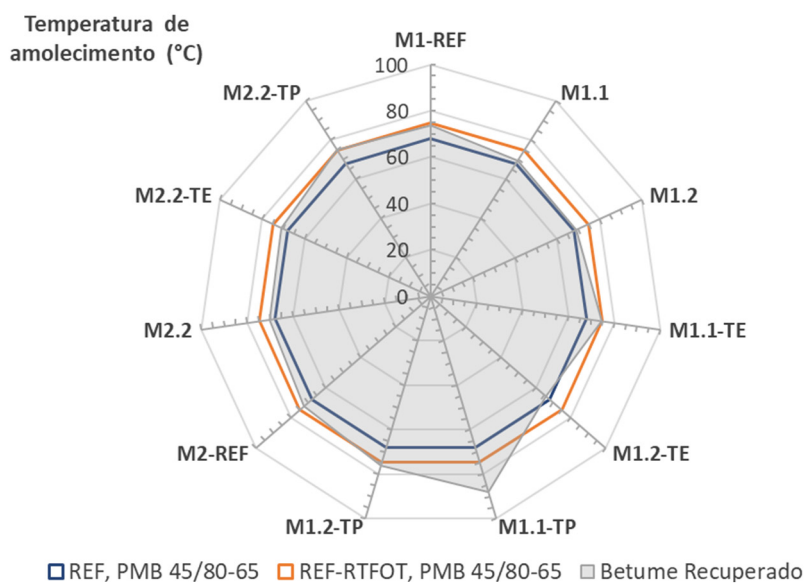


Figura 50 - Temperatura de amolecimento dos betumes utilizados.

Segundo os resultados apresentados na Figura 50, a temperatura de amolecimento do betume recuperado das misturas betuminosas com e sem reutilização de RA aumentou relativamente ao valor obtido na caracterização do betume virgem estando esse aumento, no entanto, maioritariamente alinhado com o valor da temperatura de amolecimento do betume após o ensaio de resistência ao envelhecimento (RTFOT) à exceção do betume recuperado da mistura betuminosa M1.1-TP, que apresenta valores superiores aos restantes, ao encontro do que foi constatado relativamente à penetração do betume.

4.1.3. Recuperação elástica

Na Figura 51 são apresentados os valores resultantes da recuperação elástica do betume obtidos para cada mistura betuminosa comparativamente ao betume virgem (REF, PMB 45/80-65).

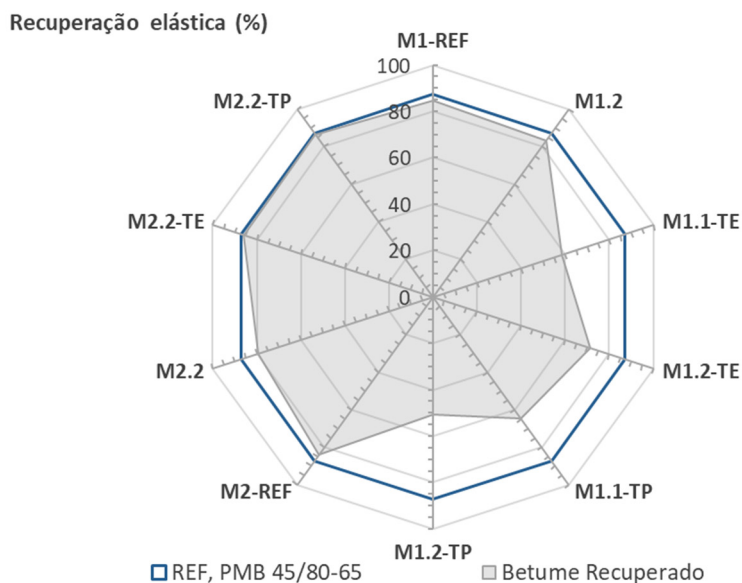


Figura 51 - Recuperação elástica dos betumes utilizados.

Os valores de recuperação elástica do betume recuperado das misturas betuminosas com e sem reutilização de RA diminuíram de acordo com a Figura 51, relativamente ao valor obtido na caracterização do betume virgem. Sendo essa diminuição significativa para as misturas M1.1-TE, M1.2-TE, M1.1-TP e M1.2-TP como resultado de um eventual envelhecimento excessivo durante o processo de fabrico em central, consequente das elevadas temperaturas de fabrico das misturas betuminosas observadas, relativamente às observadas na produção das misturas betuminosas M2.2, M2.2-TE e M2.2-TP e/ou pela diferença excessiva das temperaturas dos materiais constituintes aquando da sua introdução no misturador da central.

O ensaio com o betume recuperado da mistura betuminosa M1.1 foi considerado nulo, não havendo material para repetição não se encontra representado.

4.1.4. Força de ductilidade

Na Figura 52 são apresentados os valores da força de ductilidade dos betumes recuperados das misturas betuminosas aplicadas em trecho experimental e trecho piloto comparativamente ao respetivo betume virgem (PMB 45/80-65) utilizado na mistura betuminosa, a 15 °C.

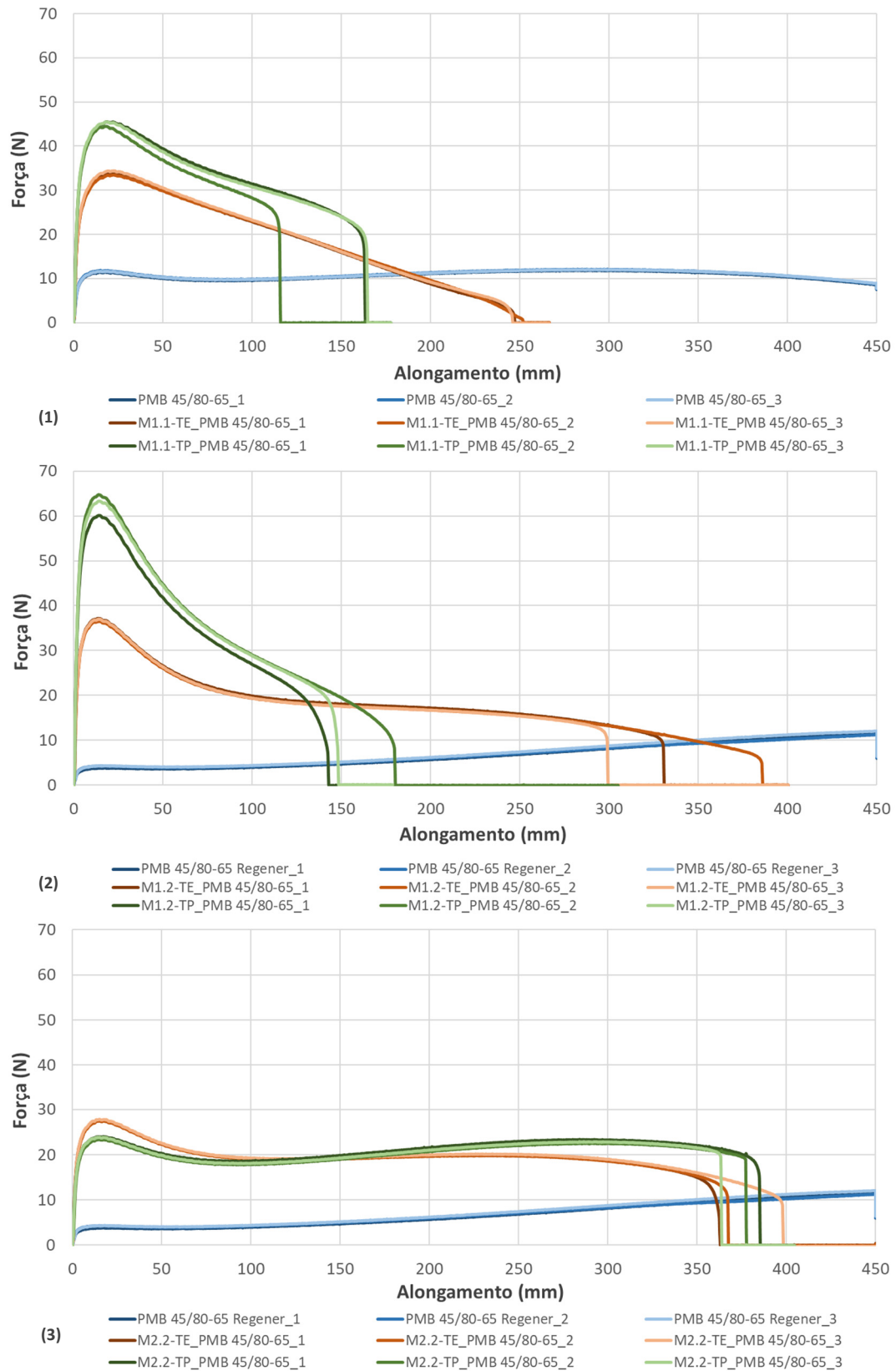


Figura 52 - Força de ductilidade dos betumes recuperados das misturas betuminosas aplicadas em TE e TP.

(1)-M1.1-TE e M1.1-TP | (2)-M1.2-TE e M1.2-TP | (3)-M2.2-TE e M2.2-TP

De acordo com os resultados apresentados na Figura 52 constata-se que o betume recuperado das M1.1-TE, M1.1-TP e M1.2-TP apresentam uma rigidez bastante superior aos dos betumes recuperados das misturas M1.2-TE, M2.2-TE e M2.2-TP tendo-se verificado uma rotura média dos provetes próxima dos 0,200 m, o que impossibilita de acordo com a norma de ensaio o cálculo da energia de coesão. Nas misturas M1.2-TE, M2.2-TE e M2.2-TP observa-se um aumento da rigidez do betume recuperado das misturas betuminosas, no entanto os provetes atingiram um valor próximo do valor máximo de extensão especificado na norma de ensaio.

Todos os betumes recuperados das misturas betuminosas com reutilização de RA evidenciam um aumento significativo da rigidez do betume, constatando-se, no entanto, que as misturas betuminosas que utilizaram o PMB 45/80-65 Regener apresentam valores bastante inferiores às que não utilizaram este tipo de betume.

4.1.5. Viscosidade

Da Figura 53 à Figura 55 são apresentadas as viscosidades do betume recuperado de cada mistura betuminosa fabricada em laboratório e das recolhidas nos trechos experimental e piloto, comparando ao betume virgem (REF, PMB 45/80-65). As linhas verticais representadas nas Figuras correspondem aos intervalos de temperatura de compactação e de fabrico da mistura betuminosa recomendados pelo fornecedor de betume.

Os betumes recuperados das misturas betuminosas de referência para cada empreitada (M1-REF e M2-REF), segundo os resultados sintetizados na Figura 53, apresentaram valores de viscosidade dinâmica coincidentes entre si uma vez que utilizam o mesmo betume como ligante. Observa-se igualmente, como expectável, um incremento da viscosidade dos ligantes recuperados relativamente aos betumes virgens como resultado do envelhecimento decorrente do fabrico em laboratório.

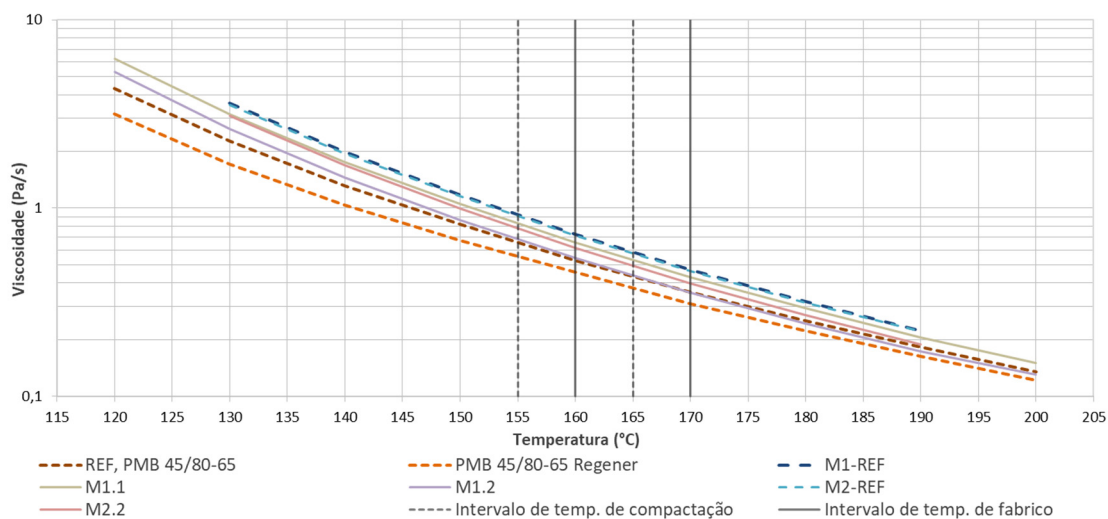


Figura 53 - Viscosidade dinâmica dos betumes recuperados das misturas betuminosas fabricadas em laboratório.

O betume recuperado das misturas betuminosas fabricadas em laboratório com RA (M1.1, M1.2 e M2.2) apresentam valores semelhantes ou inferiores de viscosidade dinâmica relativamente às misturas de referência, o que indicia que os aditivos rejuvenescedores permitem fluidificar o betume para temperaturas elevadas de fabrico e aplicação, permitindo que as misturas betuminosas com RA possam ser fabricadas e aplicadas às temperaturas indicadas para os betumes virgens utilizados no presente estudo.

Quando analisados os betumes recuperados das misturas betuminosas aplicada nos trechos experimentais (Figura 54) e piloto (Figura 55), verifica-se que na generalidade os betumes recuperados apresentam valores de viscosidade dinâmica mais altos do que os betumes recuperados das misturas betuminosas de referência fabricadas em laboratório como resultado de um maior envelhecimento no fabrico em central.

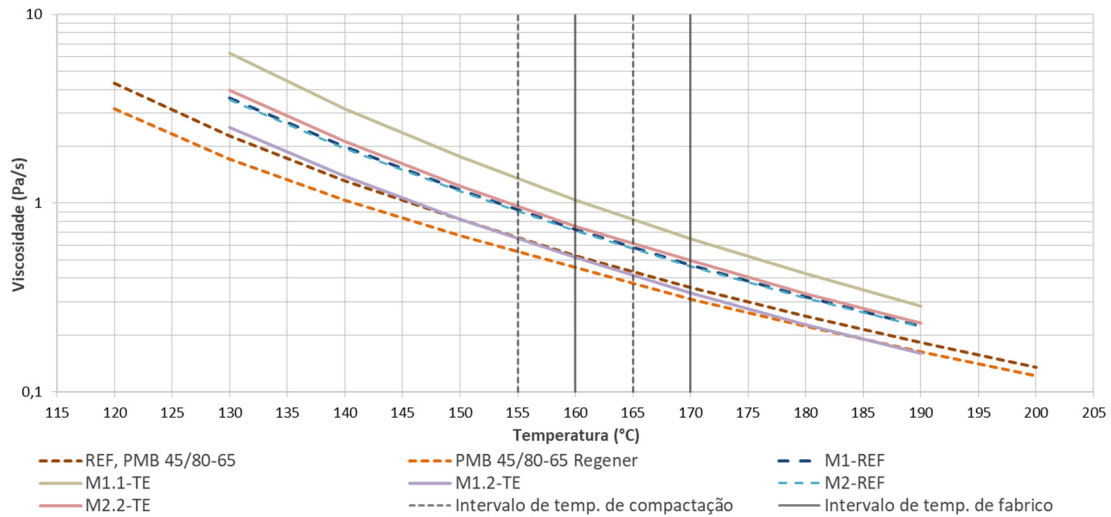


Figura 54 - Viscosidade dinâmica dos betumes recuperados das misturas betuminosas aplicadas em TE.

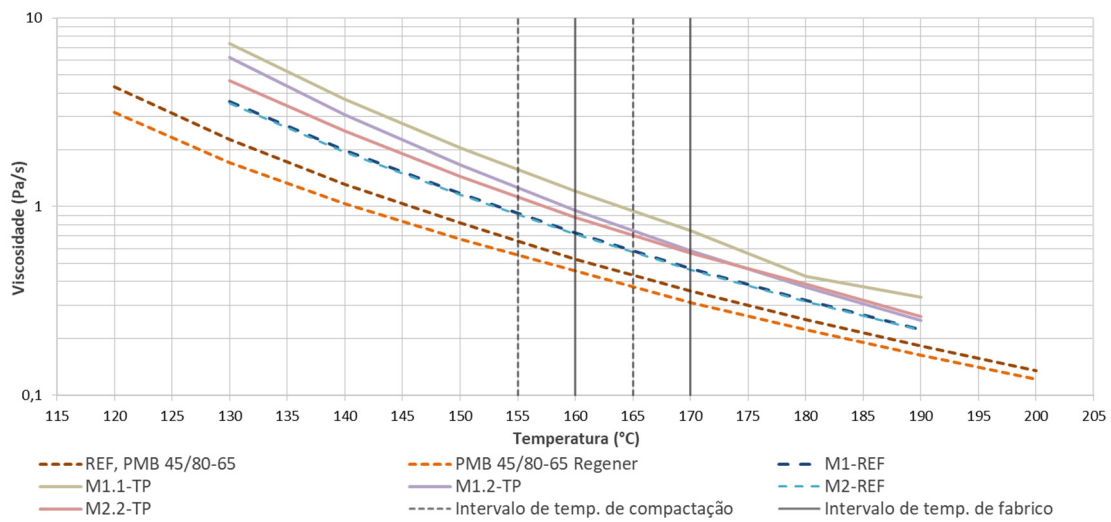


Figura 55 - Viscosidade dinâmica dos betumes recuperados das misturas betuminosas aplicadas em TP.

Segundo os resultados apresentados da Figura 53 à Figura 55, pode-se concluir que os aditivos rejuvenescedores permitiram que o betume recuperado das misturas betuminosas com reutilização de 20 % de RA apresentassem valores de viscosidade dinâmica semelhantes às apresentadas pelos betumes recuperados das misturas betuminosas de referência. Observa-se, ainda, que o efeito do fabrico das misturas betuminosas em central induz um aumento da viscosidade dinâmica do betume das misturas betuminosas com 20 % de RA.

4.2. Avaliação do desempenho mecânico

4.2.1. Marshall

Seguidamente são apresentados os resultados obtidos no ensaio Marshall das diversas misturas betuminosas avaliadas, comparando com as misturas de referência. A Figura 56 corresponde às misturas betuminosas fabricadas em laboratório e a Figura 57 às misturas betuminosas fabricadas em central e utilizadas nos trechos experimentais e piloto.

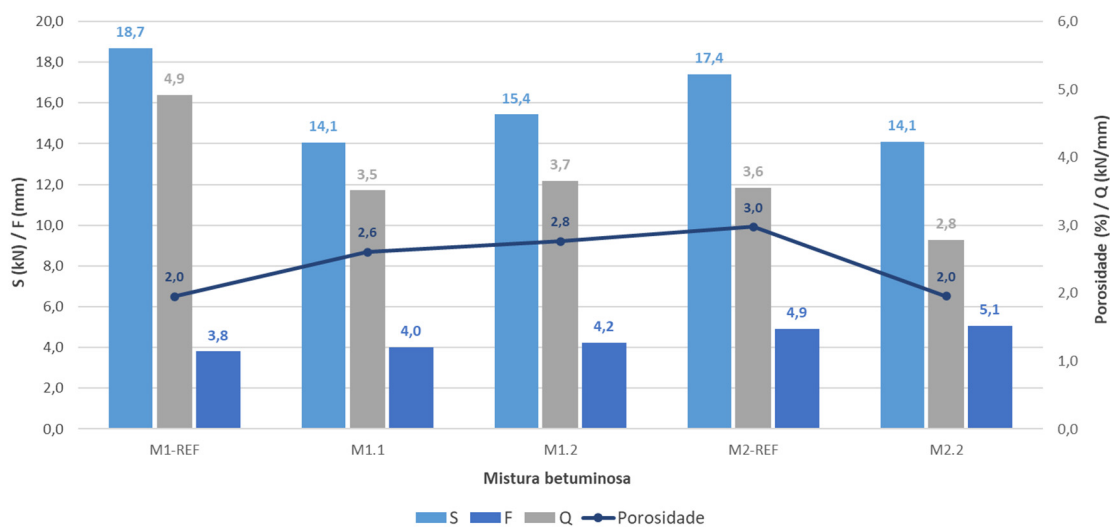


Figura 56 - Resumo dos resultados Marshall sobre misturas betuminosas produzidas em laboratório.

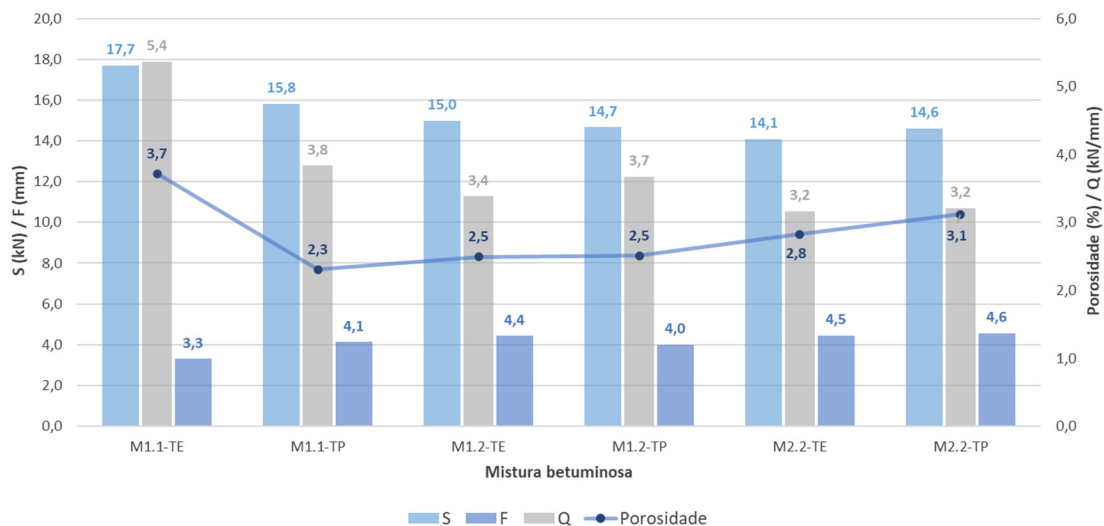


Figura 57 - Resumo dos resultados Marshall sobre misturas betuminosas produzidas em central (trecho experimental e trecho piloto).

Relativamente às Figura 56 e Figura 57 é possível observar uma diminuição da estabilidade (*S*) para todas as misturas betuminosas com reutilização de RA, relativamente às misturas de referência, o que será justificado pela utilização dos rejuvenescedores que resultam num betume de penetração mais elevada, logo a mistura betuminosa apresenta valores de rigidez inferiores. No que concerne à deformação (*F*) verifica-se que as misturas betuminosas com reutilização de RA apresentam todos valores de deformação superiores aos da respetiva mistura betuminosa de referência. Relativamente à porosidade não se verifica nenhuma correlação direta entre o aumento da porosidade e a diminuição da estabilidade. No que diz respeito ao parâmetro Quociente Marshall (*Q*) observa-se que a introdução de RA correspondeu a uma diminuição no valor deste parâmetro, em linha com a diminuição do valor da estabilidade, o que corrobora que os rejuvenescedores impediram o aumento da rigidez das misturas betuminosas com a introdução da RA. Com exceção da mistura betuminosa com adição de fibras (M1.1-TE) todas as restantes misturas apresentaram valores semelhantes quando fabricadas em laboratório ou em central.

Quando analisados os resultados relativamente ao indicado nas Cláusulas Técnicas Especiais da Brisa (CTE-Brisa, 2022; CTE-Brisa, 2023) para o comportamento mecânico das misturas betuminosas AC 14 surf (BBr), conclui-se que todas as misturas betuminosas avaliadas cumprem os parâmetros relativos ao ensaio Marshall: estabilidade máxima, *S* (12,5-21 kN); deformação, *F* (2-4 mm); e quociente Marshall, *Q* ($Q \geq 3$ kN/mm).

4.2.2. Sensibilidade à água

Na Figura 58 e na Figura 59 são apresentados os resultados da avaliação do comportamento à ação da água nas misturas betuminosas determinada em laboratório nas misturas betuminosas produzidas para os trechos experimentais e piloto, respetivamente.

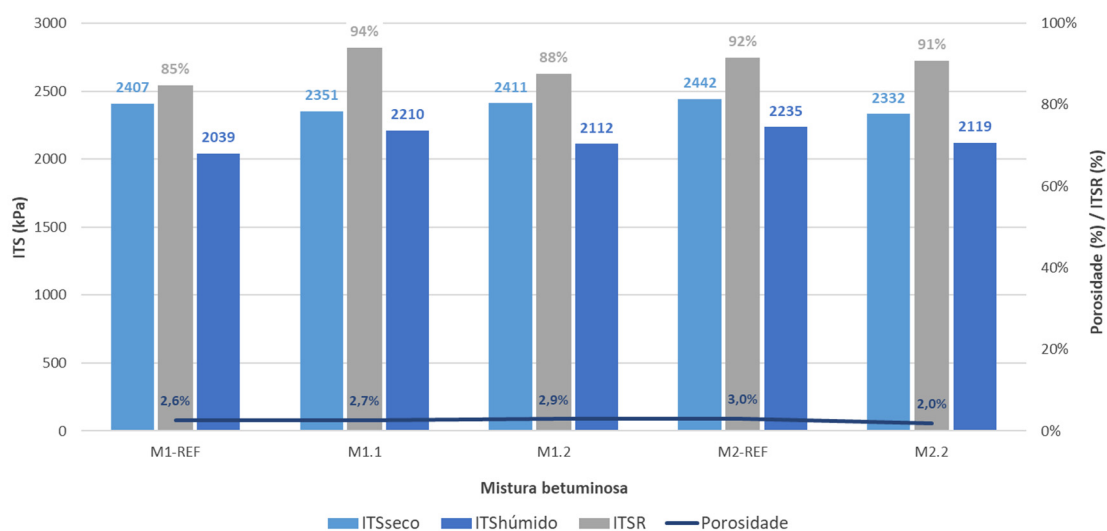


Figura 58 - Resumo dos resultados sensibilidade à água (laboratório).

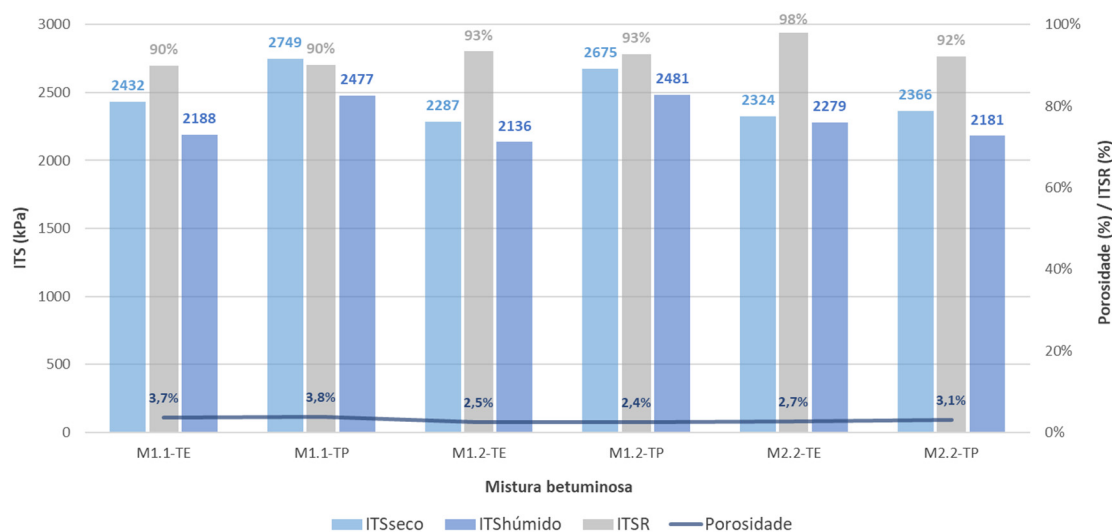


Figura 59 - Resumo dos resultados sensibilidade à água (trecho experimental e trecho piloto).

Dos resultados apresentados na Figura 58 e na Figura 59 é possível concluir que a resistência conservada em tração indireta (ITSr), assim como a ITS (resistência em tração indireta) para as misturas betuminosas com a utilização de RA foi similar ou superior às misturas de referência. Todas as misturas avaliadas cumprem com as (CTE-Brisa, 2022; CTE-Brisa, 2023) para a camada de desgaste do tipo AC 14 Surf relativamente à sensibilidade à água, ou seja: ITSr ($\geq 85\%$). A porosidade das misturas betuminosas realizadas em trechos experimentais e piloto são semelhantes às misturas betuminosas de referência à exceção da M1.1-TE e M1.1-TP, cuja porosidade em aplicação nos trechos foi maior do que a obtida em laboratório, este comportamento é corroborado com os maiores valores de viscosidade dinâmica do betume utilizado nestas misturas betuminosas (conforme Figura 54 e Figura 55), que fazem com que esta mistura apresente uma menor trabalhabilidade.

4.2.3. Resistência à deformação permanente

Na Figura 60 e na Figura 61 são apresentados os resultados da avaliação da resistência à deformação permanente das misturas betuminosas avaliadas. A Figura 60 corresponde aos resultados obtidos nas misturas betuminosas fabricadas em laboratório e a Figura 61 aos obtidos nas misturas betuminosas produzidas nos trechos experimentais. Não foi realizado o ensaio para as misturas betuminosas fabricadas em trecho piloto.

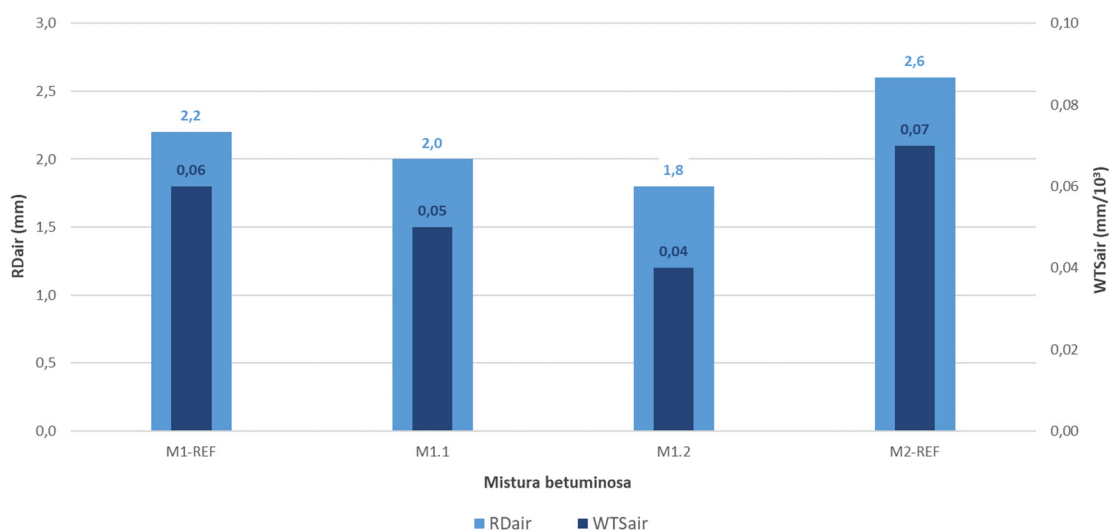


Figura 60 - Resumo dos resultados resistência à deformação permanente nas misturas betuminosas fabricadas em laboratório.

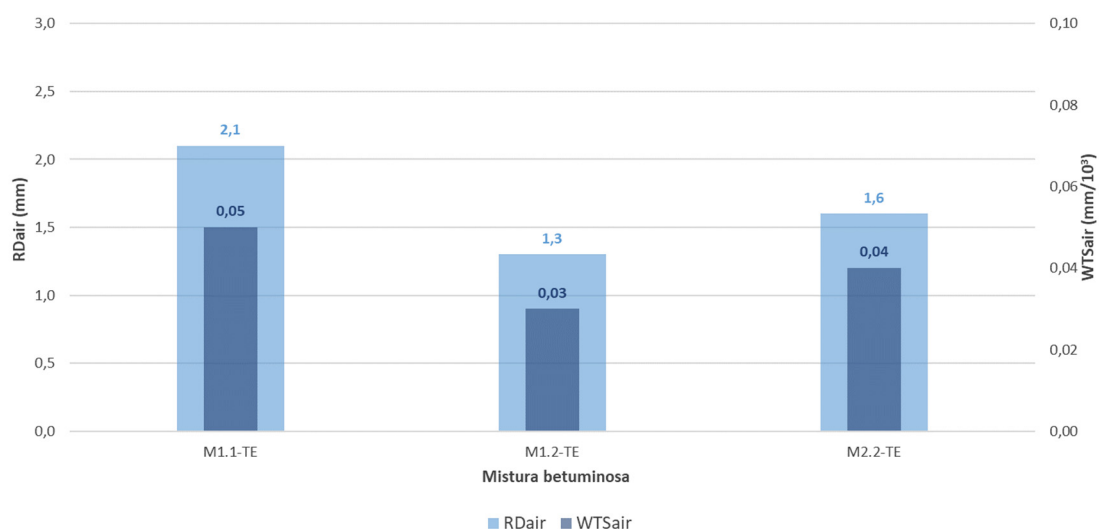


Figura 61 - Resumo dos resultados resistência à deformação permanente nas misturas betuminosas fabricadas em central (trecho experimental).

De acordo com a informação sintetizada na Figura 60 e na Figura 61, é possível constatar que as misturas betuminosas com reutilização de RA, fabricadas em laboratório (na mistura betuminosa M2.2 não foi possível realizar o ensaio de deformação permanente em amostra fabricada em laboratório) ou em central industrial e aplicadas em trecho experimental apresentam sempre valores inferiores para a taxa de deformação (WTS_{AIR}) e para a profundidade máxima de rodeira (RD_{AIR}) relativamente às misturas de referência.

Todas as misturas avaliadas cumprem com as (CTE-Brisa, 2022; CTE-Brisa, 2023) para o comportamento à deformação permanente das misturas betuminosas AC 14 surf (BBr), evidenciando um bom comportamento à deformação permanente ($WTS_{AIR} \leq 0,10$ mm/10³ ciclos).

4.2.4. Resistência ao fendilhamento por fadiga

No ensaio de avaliação do fendilhamento por fadiga segundo a EN 12697-24, foram ensaiados provetes provenientes das misturas betuminosas M1-REF, M1.1-TP, M1.2-TP, M2-REF e M2.2-TP. As misturas betuminosas foram compactadas em laboratório com cilindro de rolo metálico, de acordo com a EN 12697-33 e, obtidos por corte, conjuntos de provetes prismáticos com cerca de 50 mm de altura, 50 mm de largura e 400 mm de comprimento.

Na Tabela 15 são apresentados os resultados da avaliação da resistência ao fendilhamento por fadiga à flexão em quatro pontos nos provetes das misturas betuminosas. Os ensaios foram realizados a extensão controlada, para uma temperatura de 20 °C, aplicando-se um carregamento sinusoidal com uma frequência de 10 Hz. Os valores da extensão imposta nos ensaios variaram entre 200×10^{-6} m/m e 400×10^{-6} m/m.

Tabela 15 - Resultados dos ensaios da resistência ao fendilhamento por fadiga.

Avaliação realizada		Amostras fabricadas/ recolhidas				
		M1-REF	M1.1-TP	M1.2-TP	M2-REF	M2.2-TP
Betume	%	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Baridade, ρ_{ba}	Mg/m ³	2,415	2,406	2,414	2,414	2,409
Porosidade, V_a	%	2,6	3,8	2,4	3,0	3,1
Extensão de tração para um milhão de aplicações de carga, ϵ_6	$\times 10^{-6}$ m/m	190	206	181	253	236
Inclinação da lei de fadiga, p	-	5,9	7,7	7,1	5,9	8,3

Na Figura 62 são apresentadas as leis de fadiga obtidas para cada mistura betuminosa (M1-REF e M2-REF representadas a traço descontinuo e M1.1-TP, M1.2-TP, M2-REF e M2.2-TP, com degradê de cor relativamente à respetiva mistura de referência).

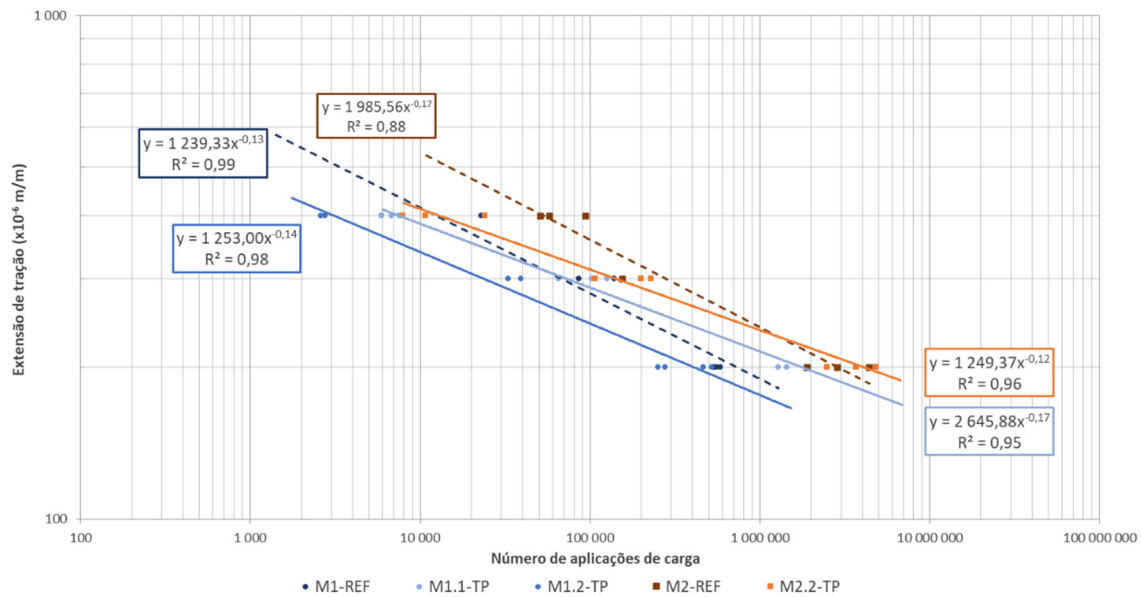


Figura 62 - Leis de fadiga das misturas betuminosas.

A análise da Tabela 15 e da Figura 62 permite constatar, genericamente, que as misturas M1-REF, M1.1-TP e M1.2-TP tendem a apresentar uma menor resistência ao fendilhamento por fadiga do que as misturas M2-REF e M2.2. Apesar da menor resistência ao fendilhamento, esta, aparentemente, não parece relacionada com o incremento da temperatura de fabrico observado em central, (ver 3.4), traduzido num incremento da viscosidade para temperaturas mais baixas (130 °C, ver Figura 55), uma vez que as misturas betuminosas de referência (M1-REF e M2-REF) apresentam a mesma tendência apesar de fabricadas em laboratório à mesma temperatura. As misturas betuminosas apresentam uma extensão de tração para um milhão de aplicações de carga (ϵ_6) variável entre 181 e 253x10⁻⁶ m/m, apresentando as misturas de referência M1-REF e M2-REF um valor entre 190 e 253x10⁻⁶ m/m, respetivamente com a mesma inclinação (5,9) para as respetivas leis de fadiga.

Os resultados permitem ainda constatar, que a reutilização de RA nas misturas betuminosas com a adição de rejuvenescedores contribui para mitigar os efeitos do betume envelhecido presente na RA, com as misturas betuminosas a apresentarem um comportamento similar às respetivas misturas de referência (sem RA). Adicionalmente, verificou-se ainda um incremento da inclinação da lei de fadiga nas misturas betuminosas com RA indiciando que os rejuvenescedores poderão contribuir para um incremento da flexibilidade das misturas betuminosas, apesar de, como seguidamente apresentado em 4.2.5, não ser evidente um menor módulo de deformabilidade para todas as misturas betuminosas com RA e rejuvenescedores.

4.2.5. Módulo de deformabilidade

Na Figura 63 são apresentados os módulos de deformabilidade para cada mistura betuminosa (M1-REF e M2-REF representadas a traço descontinuo e M1.1-TP, M1.2-TP, M2-REF e M2.2-TP, com degradê de cor relativamente à respetiva mistura de referência) utilizando diferentes frequências.

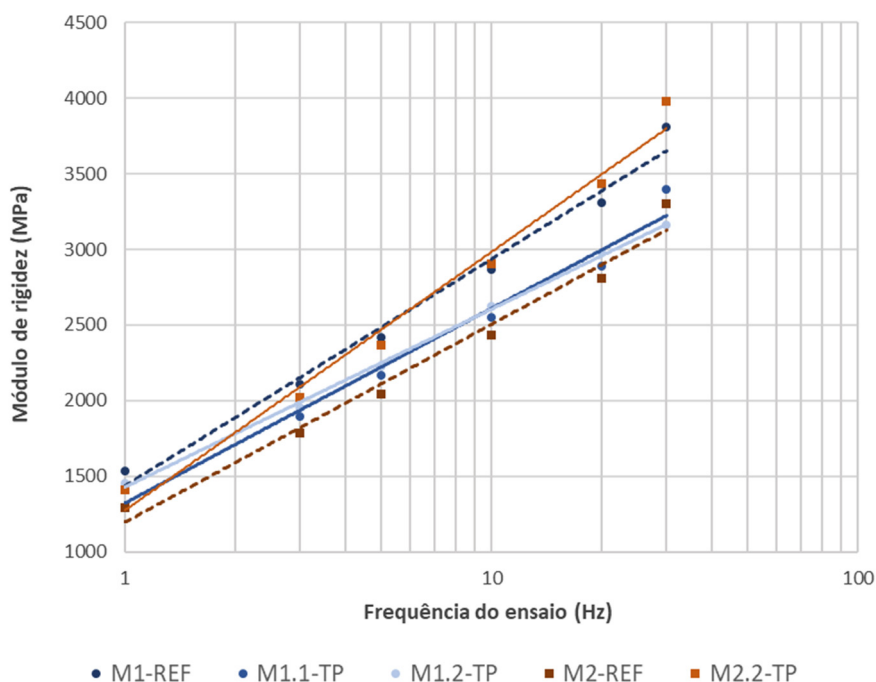


Figura 63 - Evolução do módulo de deformabilidade para diferentes frequências.

De acordo com a Figura 63 observa-se, como espectável, um aumento do módulo de deformabilidade função do incremento das frequências utilizadas (1, 3, 5, 10, 20 e 30 Hz).

O comportamento das misturas betuminosas relativamente ao módulo de deformabilidade tendeu a ser similar, independentemente da utilização de RA e rejuvenescedores, observando-se para uma frequência de 10 Hz um módulo de deformabilidade entre cerca de 2400 e 2900 MPa.

Com a reutilização de RA seria expectável um aumento do valor de módulo de deformabilidade das misturas betuminosas resultante do contributo da percentagem de betume mais endurecido presente neste material. Este pressuposto foi observado para a mistura betuminosa M2.2-TP relativamente à M2-REF, embora sem grande significado. No caso das misturas M1.1-TP e M1.2-TP apresentaram módulos de deformabilidade mais baixos que os da mistura de referência (M1-REF), também neste caso as diferenças não são significativas. Os resultados evidenciam que a adição dos rejuvenescedores permitiu um contributo significativo no rejuvenescimento do betume envelhecido relativamente às misturas betuminosas de referência.

4.3. Avaliação do desempenho funcional das misturas betuminosas - Macrotextura

Na Figura 64 são apresentados os resultados da avaliação da macrotextura das misturas betuminosas avaliadas em trecho piloto.

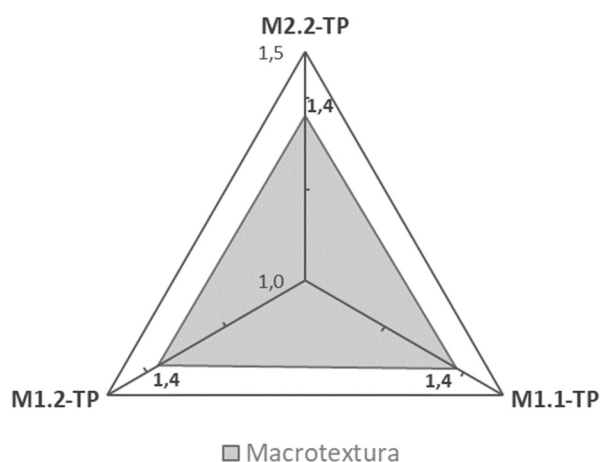


Figura 64 - Resumo dos resultados macrotextura (trecho piloto).

As misturas betuminosas aplicadas nos trechos piloto apresentam valores de macrotextura média iguais. Estes valores devem-se ao facto de as misturas betuminosas aplicadas apresentarem curvas granulométricas semelhantes e, também, pelo facto dos agregados apresentarem parâmetros de forma, índices de achatamento e alongamento, semelhantes.

Os resultados, quando analisados comparativamente ao indicado nas Cláusulas Técnicas Especiais da Brisa (CTE-Brisa, 2022; CTE-Brisa, 2023) para a macrotextura das misturas betuminosas AC 14 surf (BBr), encontram-se dentro do limite especificado ($\geq 1,1$ mm).

Capítulo V

Conclusões e desenvolvimentos futuros

[página propositadamente em branco]

5. Conclusões e desenvolvimentos futuros

5.1. Considerações finais

O presente trabalho descreve o estudo realizado para avaliação do comportamento de misturas betuminosas do tipo AC14 Surf PMB (BBr) sem e com reutilização de 20 % de material recuperado (RA) de misturas betuminosas fresadas de camadas de desgaste em fim de vida, através da utilização de: (i) mistura betuminosas fabricadas em laboratório; (ii) misturas betuminosas fabricadas em central e aplicadas em trechos experimentais e (iii) misturas betuminosas fabricadas em central e aplicadas em trechos piloto na autoestrada. O trabalho concretizado permitiu obter as seguintes conclusões principais:

Formulação das misturas betuminosas em laboratório:

- O tempo necessário para fabricar a mistura betuminosa com RA foi significativamente superior (700s) comparativamente à mistura betuminosa de referência (330s), consequência da utilização da RA à temperatura ambiente durante o fabrico;
- O tempo requerido para fabrico das misturas betuminosas com RA é igual, para ambos os aditivos rejuvenescedores. No entanto, para o caso da utilização do aditivo com fibras celulósicas foi necessário adicionar o aditivo conjuntamente com o fíler;
- Não se constataram diferenças de trabalhabilidade e homogeneidade entre as misturas betuminosas sem e com reutilização de RA.

Transposição da composição das misturas betuminosas do laboratório para a produção em central:

- A tecnologia das centrais de misturas betuminosas utilizadas no âmbito deste trabalho para reutilização de RA envolveu a introdução da fração de RA no misturador à temperatura ambiente, este método implica que seja o agregado virgem o responsável por garantir que a mistura betuminosa atinja a temperatura de fabrico definida. Assim, foi necessário proceder a um sobreaquecimento do agregado virgem para compensar a temperatura da RA;
- A utilização do aditivo rejuvenescedor com fibras celulósicas, requereu à semelhança do que é efetuado nas misturas betuminosas SMA (Stone Mastic Asphalt), a utilização de um alimentador para introdução de aditivos sólidos no misturador. Neste caso, não foi necessário incrementar o tempo de mistura das fibras com os agregados uma vez que, a utilização da RA requer um tempo adicional de mistura antes da introdução do betume;
- A utilização de um betume com rejuvenescedor requer em central a disponibilidade de um tanque dedicado para armazenamento do betume;
- O tempo de fabrico de uma mistura betuminosa com RA em central relativamente às misturas betuminosas de referência (sem RA) envolveu um incremento de cerca de 50 % por amassadura.

Execução dos trechos experimentais:

- A caracterização laboratorial realizada nas misturas betuminosas aplicadas nos trechos experimentais permitiu confirmar que as características de desempenho mecânico e funcional das misturas betuminosas estudadas, nomeadamente, as características volumétricas, a sensibilidade à água, a resistência à deformação permanente e macrot textura, apresentaram valores similares às misturas betuminosas de referência, o que indicou que a reutilização de 20 % de RA na fração utilizada, com a adição de rejuvenescedores não compromete o desempenho esperado para estas misturas betuminosas;
- A realização dos trechos experimentais permitiu validar os meios tecnológicos propostos pelos empreiteiros para a realização dos trechos piloto em autoestrada, evidenciando a sua importância durante o processo construtivo responsável.

Execução dos trechos piloto:

- A caracterização laboratorial realizada nas misturas betuminosas aplicadas nos trechos piloto permitiu reiterar os resultados obtidos aquando da execução do trecho experimental, designadamente o bom desempenho das misturas betuminosas com reutilização de RA e adição de rejuvenescedores.

No global, o desenvolvimento deste trabalho permitiu concluir que:

- É fundamental caracterizar a RA que se pretende reutilizar no fabrico das misturas betuminosas, nomeadamente o ligante residual, por forma a seleccionar o par betume-aditivo que melhor se adapte às exigências da nova mistura betuminosa;
- É, ainda, possível concluir que os betumes recuperados das misturas betuminosas com reutilização de RA, utilizando aditivos rejuvenescedores, tiveram desempenhos similares ao betume da mistura betuminosa de referência. Tal evidencia o contributo dos rejuvenescedores para mitigar o efeito do betume envelhecido da RA nas características requeridas para o betume virgem;
- O tipo de central de produção de misturas betuminosas condiciona as percentagens de RA que podem ser incorporadas nas misturas betuminosas. As centrais descontínuas onde foram fabricadas as misturas betuminosas, no âmbito deste estudo, são as que possuem uma tecnologia mais limitativa relativamente ao incremento da percentagem de reutilização de RA, resultante da sua adição à temperatura ambiente no misturador, tendo a temperatura de mistura de ser alcançada através do sobreaquecimento do agregado virgem;
- O aumento de reutilização de RA traz alguns desafios a serem considerados, nomeadamente, na adaptação das centrais de produção das misturas betuminosas, com sistemas e tecnologia que permitam o pré-aquecimento da RA para evitar: i) aumentos significativos das temperaturas dos agregados virgens; ii) o choque térmico entre o agregado e o ligante, que contribui para um envelhecimento precoce do ligante; iii) incremento do consumo energético e emissões de gases com efeito de estufa;
- A indústria da pavimentação terá, ainda, de adaptar os processos e meios dedicados à demolição, armazenamento, processamento e classificação dos pavimentos demolidos, para disponibilizar RA de forma consistente ao mercado com características apropriadas ao fabrico de novas misturas betuminosas com reutilização de RA;
- A reutilização de 20 % de RA na fração seleccionada (16 RA 0/10 mm) proveniente de camadas de desgaste em fim de vida com aditivos rejuvenescedores, em novas camadas de

desgaste de autoestradas foi concretizada com sucesso, sem comprometer o respetivo desempenho mecânico e funcional.

5.2. Desenvolvimentos futuros

As conclusões obtidas permitem perspetivar a necessidade de desenvolvimentos futuros, nomeadamente:

- A monitorização das características superficiais dos trechos experimentais/piloto, para acompanhamento do desempenho das misturas betuminosas aplicadas em serviço;
- Implementação de declarações ambientais de produto (DAP), que permitam uniformizar a quantificação das emissões de CO₂e das misturas betuminosas para que o desempenho ambiental das diversas soluções com reutilização de RA possa ser comparadas e avaliadas pelas empresas de forma equitativa e sustentada;
- O contínuo desenvolvimento de soluções, com recurso a novos produtos/aditivos que permitam reutilizar maiores percentagens de RA, bem como o desenvolvimento de especificações nos contratos e cadernos de encargos dos donos de obra que incentivem a utilização de misturas betuminosas com reutilização de RA de forma controlada e responsável;
- Disseminação e partilha do conhecimento dos estudos desenvolvidos pelas diversas entidades é fundamental para assegurar a transferência de conhecimento adquirido.

5.3. Outras atividades desenvolvidas no âmbito do estágio curricular

Complementarmente aos trabalhos inerentes ao desenvolvimento da dissertação de mestrado aqui apresentada, foram desenvolvidas outras atividades que se traduzem em enriquecimento científico e técnico, destacando-se:

- Escrita, submissão de artigo e apresentação de comunicação oral na Conferência Internacional Transport Research Arena (TRA2024) - Transport Transitions: Advancing Sustainable and Inclusive Mobility (Dublin), com o título “A contribution for a sustainable, resilient road infrastructure management from Brisa, a Portuguese Road Concessionaire” (Vieira et al., 2024).

- Escrita e submissão de artigo apresentado no XXII Congresso Ibero-Latino-Americano de Asfalto (CILA) 2024, com o título “Novos ligantes especialmente desenvolvidos para a incorporação de elevadas percentagens de fresados” (Carvalho et al., 2024).

No decorrer do estágio profissional e adicionalmente à componente académica que a signatária desenvolveu na empresa Brisa, a signatária acompanhou e participou nas seguintes atividades ao longo de 2023/2024:

- Acompanhamento de diversos estudos desenvolvidos no laboratório no âmbito do projeto “Pavimentos Sustentáveis”, com materiais/soluções distintas que envolveram: (i) incorporação de plásticos reciclados em camadas de ligação e de desgaste (Miranda et al., 2023a, 2023c, 2023b, 2024; Rato et al., 2022); (ii) incorporação de borracha reciclada de pneus em betume modificado (tecnologia inovadora na Europa) em misturas betuminosas sem e com RA (Miranda, 2024) e (iii) estudos das composições para misturas betuminosas temperadas sem e com RA. O acompanhamento dos estudos considerou a participação em atividades como:
 - Elaboração de estudos laboratoriais;
 - Transposição dos estudos desenvolvidos em laboratório para as centrais de produção de misturas betuminosas;
 - Acompanhamento da aplicação das misturas betuminosas em obra;
 - Acompanhamento da realização de ensaios “*in situ*”;
 - Análise de resultados;
 - Elaboração das cláusulas técnicas especiais para a utilização de misturas betuminosas recuperadas em camadas de desgaste.
- Desenvolvimento de competências para os ensaios de compressão de betão, nomeadamente na realização dos ensaios, validação e emissão de relatórios para os clientes.
- Componente de gestão de laboratório que envolveram as seguintes atividades:
 - Validação de relatórios de ensaio na área dos betões, ligantes betuminosos e misturas betuminosas;
 - Acompanhamento das auditorias do Sistema de Gestão de Qualidade implementado na BGI pelas normas ISO 9001/ ISO 14001/ ISO 45001;
 - Participação na elaboração da revisão do Sistema de Gestão implementado no laboratório anterior à auditoria de renovação;
 - Participação e acompanhamento na auditoria de renovação do IPAC pela norma NP EN ISO 17025 (áreas técnicas e de gestão);
 - Participação na recolha de dados para o cálculo de indicadores de gestão do laboratório;

- Validação e testes da aplicação para gestão de equipamento a ser implementada no laboratório.



Figura 65 - Equipa do laboratório da Brisa.

Capítulo VI

Referências bibliográficas

[página propositadamente em branco]

6. Referências bibliográficas

- Antunes, V., Neves, J., & Freire, A. C. (2021). Performance assessment of reclaimed asphalt pavement (RAP) in road surface mixtures. *Recycling*, 6(2). <https://doi.org/10.3390/recycling6020032>
- Branco, F., Pereira, P., & Santos, P. (2006). Pavimentos Rodoviários (2nd ed.). Almedina.
- Brisa. (2022). Relatório Integrado 1º Semestre 2022. Brisa, 1–85.
- Carvalho T, Vieira C, Domingues D, & Rato M J. (2024). Novos ligantes especialmente desenvolvidos para a incorporação de elevadas percentagens de fresados. XXII Cila.
- Commission European. (2022). Diretiva do parlamento Europeu e do Conselho relativa ao dever de diligência das empresas em matéria de sustentabilidade e que altera a Diretiva (UE) 2019/1937. 1–77. <https://doi.org/10.1787/9789264115415-en>
- Costa, E. B. C., de França, M. S., Bergossi, F. L. N., & Borges, R. K. (2020). Squeeze flow of mortars on brick substrate and its relation with bond strength. *Construction and Building Materials*, 265, 1–8. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.120298>
- CTE-Brisa. (2022). Cláusulas Técnicas Especiais A3-Braga Oeste/ EN201. Brisa.
- CTE-Brisa. (2023). Caderno de Encargos Cláusulas Técnicas Especiais - Empreitada para a beneficiação do pavimento do sublanço Águas Santas (A3/A4)/ Maia (A3/A4) da Auto-estrada Porto/ Valença. Brisa, 1–88.
- Dams, B., Maskell, D., Shea, A., Allen, S., Driesser, M., Kretschmann, T., Walker, P., & Emmitt, S. (2021). A circular construction evaluation framework to promote designing for disassembly and adaptability. *Journal of Cleaner Production*, 316, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128122>
- Duan, Z., Hou, S., Xiao, J., & Singh, A. (2019). Rheological properties of mortar containing recycled powders from construction and demolition wastes. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117622>
- EAPA. (2018). Recommendations for the use of rejuvenators in hot and warm asphalt production. European Asphalt Pavement Association, 1–13.
- EAPA. (2021). Asphalt in figures 2021. European Asphalt Pavement Association, 1–13.
- EAPA. (2022a). Asphalt in figures 2022. European Asphalt Pavement Association, 1–13.
- EAPA. (2022b). The Circular Economy of Asphalt -EAPA Technical Review. European Asphalt Pavement Association, 1–34. www.eapa.org

- Eskandarsefat, S. (2022). Rejuvenator: A key for long- lasting recycled asphalt mixtures. Roads and Recycling: A Sustainable Development.
- European Commission. (2018). Impacts of circular economy policies on the labour market - Final report. Cambridge Econometrics, Trinomics, e ICF.
- European Commission. (2021). Pacto Ecológico Europeu - Cumprir os nossos objetivos. European Commission, 1–26.
- European Union. (2021). Novo plano de ação para a economia circular. Jornal Oficial Da União Europeia, 1–19. <https://science.sciencemag.org/content/369/6510/1455>
- Hertwich, E., Lifset, R., Pauliuk, S., & Heeren, N. (2020). Resource efficiency and climate change - Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future. IRP - International Resource Panel. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3542680>
- INIR. (2006). Construção e reabilitação de pavimentos reciclagem de pavimentos. INIR - Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias IP, 1–51.
- Kandhal, P. S. ; M. R. B. (1997). Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments. LNEC E 472. (2009). Guia para a reciclagem de misturas betuminosas a quente em central. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 1–4.
- Miranda H., Domingues D., & Rato M. J. (2023a). Influence of recycled plastics on the mechanical behaviour of bituminous mixtures for highway surface layers. XXVIIth World Road Congress Prague.
- Miranda H., Domingues D., & Rato M. J. (2023b). Should Brisa start using recycled plastics in its pavements? Transportation Research Procedia, 72, 981–988. <https://doi.org/10.1016/J.TRPRO.2023.11.526>
- Miranda H., Domingues D., & Rato M. J. (2023c). The influence of recycled plastics added via the dry process on the properties of bitumen and asphalt mixtures. Transportation Engineering, 13. <https://doi.org/10.1016/J.TRENG.2023.100197>
- Miranda H., Domingues D., & Rato M. J. (2024). End of the line for recycled plastics on asphalt mixtures in Portugal? Research and road applications. 10th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements.
- Miranda H. M. B. (2024). Experiência betume elaster híbrido. Jornadas Asfaltos 2024, Cepsa.
- PIARC. (2021). Use of recycled materials in pavements. PIARC - World Road Association, 1–110. <http://www.piarc.org>
- PIARC. (2022). Carbon neutrality of the road sector. PIARC - World Road Association, 1–167.
- Pouranian, M. R., & Shishebor, M. (2019). Sustainability assessment of green asphalt mixtures: A review. Environments - MDPI, 6(6), 1–55. <https://doi.org/10.3390/environments6060073>
- Rato M. J., Domingues D., Miranda H., & Antunes V. (2022). Pavimentos sustentáveis com incorporação de plásticos reciclados. X Congresso Rodoferroviário Português.
- Ribeiro Portugal, C., Fonyo, C., Cardoso Machado, C., Meganck, R., Jarvis, T., & Jaromir Kleme, J. (2020). Handling editor. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121372>
- Road Surface Technology. (2020). Softeners versus rejuvenators. Road Surface Technology, 1–3. www.worldhighways.com
- Senior-Arrieta, V., & Graciano, C. (2021). Experimental investigation on the rutting resistance of permeable friction courses. Construction and Building Materials, 268, 121210. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.121210>
- Soares, A., Cristina Simões, A., Dias, A., Gonçalves, A., Gomes, B., Barbosa, C., Lico, I., Dias, J., André, J., Vicente Ferreira, J., Costa, L., Teixeira, M., Inês Santos, M., Almeida, M., Santos, M., Frazão, R., Ângelo, S., & Lamego Vitor Martins, S. (2023). SC5-Avaliação do Ciclo de Vida. Agência Portuguesa Do Ambiente (Apa), 1–51.
- Tarsi, G., Tataranni, P., & Sangiorgi, C. (2020). The challenges of using reclaimed asphalt pavement for new asphalt mixtures: A review. In Materials (Vol. 13, Issue 18). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ma13184052>

- Vandewalle, D., Antunes, V., Neves, J., & Freire, A. C. (2020). Assessment of eco-friendly pavement construction and maintenance using multi-recycled rap mixtures. *Recycling*, 5(3), 1–21. <https://doi.org/10.3390/recycling5030017>
- Vieira C, Correia E, Domingues D, Rato M J, Caetano F, & Miranda H. (2024). A contribution for a sustainable, resilient road infrastructure management from Brisa, a Portuguese Road Concessionaire. *Transport Research Arena (TRA2024) - Transport Transitions: Advancing Sustainable and Inclusive Mobility*.
- Williams, B., Willis, J., & Ross, T. (2018). Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage. NAPA - National Asphalt Pavement Association. www.AsphaltPavement.org
- Wu, S., Liu, Q., Yang, J., Yang, R., & Zhu, J. (2020). Study of adhesion between crack sealant and pavement combining surface free energy measurement with molecular dynamics simulation. *Construction and Building Materials*, 240, 117900. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.117900>
- Youssf, O., Mills, J. E., Benn, T., Zhuge, Y., Ma, X., Roychand, R., & Gravina, R. (2020). Development of Crumb Rubber Concrete for Practical Application in the Residential Construction Sector – Design and Processing. *Construction and Building Materials*, 260, 119813. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.119813>
- Yu, J., Lin, Z., Zou, G., Yu, H., Leng, Z., & Zhang, Y. (2024). Long-term performance of recycled asphalt mixtures containing high RAP and RAS. In *Journal of Road Engineering* (Vol. 4, Issue 1, pp. 36–53). KeAi Publishing Communications Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jreng.2024.01.003>
- Zaumanis, M., Mallick, R. B., & Frank, R. (2014). 100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 92, 230–245. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2014.07.007>

Normas ou regulamentos

- EN 12697-1:2020 Bituminous mixtures - Test methods - Part 1: Soluble binder content
- EN 12697-2:2015 + A1 de 2019 Bituminous mixtures - Test methods - Part 2: Determination of particle size distribution
- EN 12697-3:2013+A1 de 2018 Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 3: Bitumen recovery: Rotary evaporator
- EN 12697-5:2018 Bituminous mixtures - Test methods - Part 5: Determination of the maximum density
- EN 12697-6:2020 Bituminous mixtures - Test methods - Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens
- EN 12697-8:2018 Bituminous mixtures - Test methods - Part 8: Determination of void characteristics of bituminous
- EN 12697-11:2020 Bituminous mixtures - Test methods - Part 11: Determination of the affinity between aggregate and bitumen
- EN 12697-12:2018 Bituminous mixtures - Test methods - Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens
- EN 12697-22:2020 + A1 de 2023 Bituminous mixtures - Test methods - Part 22: Wheel tracking
- EN 12697-23:2017 Bituminous mixtures - Test methods - Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens
- EN 12697-24:2018 Bituminous mixtures - Test methods - Part 24: Resistance to fatigue
- EN 12697-26:2018 + A1 de 2022 Bituminous mixtures - Test methods - Part 26: Stiffness
- EN 12697-27: 2017 Bituminous mixtures - Test methods - Part 27: Sampling

EN 12697-28:2020 Bituminous mixtures - Test methods - Part 28: Preparation of samples for determining binder content, water content and grading

EN 12697-29:2020 Bituminous mixtures - Test methods - Part 29: Determination of the dimensions of a bituminous specimen

EN 12697-30:2018 Bituminous mixtures - Test methods - Part 30: Specimen preparation by impact compactor

EN 12697-33:2019 Bituminous mixtures - Test method - Part 33: Specimen prepared by roller compactor

EN 12697-34:2020 Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 34: Marshall test

EN 12697-35:2016 Bituminous mixtures - Test methods - Part 35: Laboratory mixing

EN 12697-42:2021 Bituminous mixtures - Test methods - Part 42: Amount of foreign matter in reclaimed asphalt

NP EN 13036-1:2011 Características superficiais de pavimentos de estradas e de aeroportos Métodos de ensaio. Parte 1: Medição da profundidade da macrotextura da superfície do pavimento através da técnica volumétrica da mancha

EN 933-1:2012 Tests for geometrical properties of aggregates - Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method

EN 933-2:2020 Tests for geometrical properties of aggregates - Part 2: Determination of particle size distribution - Test sieves, nominal size of apertures

EN 933-3:2012 Tests for geometrical properties of aggregates - Part 3: Determination of particle shape - Flakiness index

EN 933-8+A1:2015 Tests for geometrical properties of aggregates - Part 8: Assessment of fines - Sand equivalent test

EN 933-9:2022 Tests for geometrical properties of aggregates - Part 9: Assessment of fines - Methylene blue test

EN 933-10:2009 Tests for geometrical properties of aggregates - Part 10: Assessment of fines - Grading of filler aggregates (air jet sieving)

EN 1097-1:2011 Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 1: Determination of the resistance to wear (micro-Deval)

EN 1097-2:2020 Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 2: Methods for the determination of resistance to fragmentation

EN 1097-6:2022 Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 6: Determination of particle density and water absorption

EN 1097-8:2020 Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 8: Determination of the polished stone value

EN 1426:2015 Bitumen and bituminous binders - Determination of needle penetration

EN 1427:2015 Bitumen and bituminous binders - Determination of the softening point - Ring and Ball method

NP EN 12593:2017 Betumes e ligantes betuminosos Determinação da temperatura de fragilidade Fraass

NP EN 12607-1:2016 Betumes e ligantes betuminosos Determinação da resistência ao envelhecimento sob a influência do calor e do ar. Parte 1: Método RTFOT

EN 13302:2018 Bitumen and bituminous binders - Determination of dynamic viscosity of bituminous binder using a rotating spindle apparatus

EN 13398:2017 Bitumen and bituminous binders - Determination of the elastic recovery of modified bitumen

EN 13589:2018 Bitumen and bituminous binders - Determination of the tensile properties of modified bitumen by the force ductility method

NP EN 12591: 2011 Betumes e ligantes betuminosos Especificações para betumes de pavimentação

NP EN 14023:2013 Betumes e ligantes betuminosos - Quadro de especificações de betumes modificados com polímeros

NP EN 13108-1:2016 Bituminous mixtures - Material specifications - Part 1: Asphalt Concrete

NP EN 13108-5:2016 Bituminous mixtures - Material specifications - Part 5: Stone Mastic Asphalt

NP EN 13108-7:2016 Bituminous mixtures - Material specifications - Part 7: Porous Asphalt

NP EN 13108-8:2016 Bituminous mixtures - Material specifications - Part 8: Reclaimed asphalt

NP EN ISO/IEC 17025:2018 Requisitos gerais de competência para laboratórios de ensaio e calibração – (ISO/IEC 17025:2017)

NP EN ISO 9001:2015 Sistemas de Gestão da Qualidade - Requisitos (ISO 9001:2015)

NP EN ISO 14001:2015 Sistemas de gestão ambiental Requisitos e linhas de orientação para a sua utilização (ISO 14001:2015)

NP EN ISO 45001:2023 Sistemas de gestão da segurança e saúde no trabalho. Requisitos e orientação para a sua utilização (ISO 45001:2018)

[página propositadamente em branco]

Anexos
(DVD-Rom)

[página propositadamente em branco]

7. Anexos

Os anexos podem ser consultados em DVD-Rom

Anexo 1 - Tabela das frações granulométricas para as misturas betuminosas

[página propositadamente em branco]

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Eu, **Carina Inês Moreira Vieira**, N.º CC: 30348339-3-ZW3,

Declaro ter conduzido e desenvolvido este trabalho académico com integridade e ética. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à elaboração da dissertação/projeto/estágio.

Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim.

Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO.

Carina Inês Moreira Vieira

ISEP, Porto, 8 de julho de 2024