

Desenvolvimento e Avaliação de Misturas Betuminosas para Camadas de Desgaste Incorporando Resíduos Industriais

Hernán Patricio Moyano Ayala

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

(2^o ciclo de estudos)

Orientadora: Prof.^a Doutora Marisa Sofia Fernandes Dinis de Almeida

Maio de 2024

Declaração de Integridade

Eu, Hernán Patricio Moyano Ayala, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição M13755 de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia, declaro ter desenvolvido o presente trabalho e elaborado o presente texto em total consonância com o **Código de Integridades da Universidade da Beira Interior**.

Mais concretamente afirmo não ter incorrido em qualquer das variedades de Fraude Académica, e que aqui declaro conhecer, que em particular atendi à exigida referenciação de frases, extratos, imagens e outras formas de trabalho intelectual, e assumindo assim na íntegra as responsabilidades da autoria.

Universidade da Beira Interior, Covilhã 17 /05 /2024

Eng. Hernán Patricio Moyano Ayala

NIF: 321274628

Agradecimentos

Quero expressar o meu mais sincero agradecimento à minha excepcional professora, Marisa Dinis de Almeida. Sem dúvida, a sua grande capacidade intelectual e o seu compromisso inabalável com o crescimento dos seus alunos foram o que tornaram esta dissertação possível. Sinto-me verdadeiramente afortunado por ter tido uma grande mestra, que me proporcionou conhecimento, me motivou, me impulsionou e validou a minha opinião como profissional. A sua tolerância, adaptabilidade, versatilidade e paixão pelo ensino e inovação tornam-na um modelo a seguir. Estou-lhe profundamente agradecido pelo seu valioso tempo e dedicação. Obrigado por me inspirar a alcançar os meus objetivos e acreditar no meu potencial. A sua influência perdurará durante a minha carreira profissional e vida pessoal. Muito obrigado, querida professora.

Da mesma forma, desejo expressar o meu mais sincero agradecimento aos professores Miguel Costa Santos Nepomuceno, Clemente Martins Pinto e Luis Filipe Almeida Bernardo, cuja ajuda, orientação e apoio foram fundamentais para concluir com sucesso esta dissertação. Obrigado pelo seu compromisso e generosidade.

À CEPSA, na pessoa da Eng^a Teresa Carvalho, pelo fornecimento dos ligantes utilizados neste trabalho experimental.

À Diamantino Jorge & Filhos, na pessoa do Eng.^o Luís Mendes, pelo fornecimento dos agregados certificados graníticos e grauaques da Mina da Panasqueira assim como do fornecimento da formulação das misturas tradicionais para camada de desgaste com agregados graníticos.

À Universidade da Beira Interior, e em particular ao Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura (DECA), desejo expressar a minha profunda gratidão pelo apoio fundamental prestado durante a realização desta dissertação e por me permitir o uso dos laboratórios de ensaios.

Ao Sr. António Félix, técnico dos laboratórios do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura da UBI, expresso o meu sincero agradecimento pela sua boa disposição e pelo crucial apoio durante a realização do trabalho experimental.

Quero aproveitar este espaço para expressar o meu profundo agradecimento a todos aqueles que sempre estiveram ao meu lado, dando-me o seu apoio incondicional e mantendo viva a fé em mim. Além disso, quero agradecer e brindar pela beleza da vida em si, desejando que cada um de vocês, quer seja como leitor ou Engenheiro Civil, encontre plenitude e felicidade

no seu caminho. Encorajo todos a viajar, a viver intensamente cada experiência que a vida nos oferece, pois, todas estas vivências enriquecem a alma e fazem-nos crescer. Riam, chorem, apaixonem-se, desapaixonem-se, dançam, cantem, estudem, deixem a vossa marca na história e, o mais importante de tudo, sejam felizes. A minha gratidão estende-se à minha querida família e a cada pessoa que fez parte do meu percurso, o vosso apoio levou-me a alcançar esta nova meta. A todos vocês, muito obrigado.

Quero ainda expressar o meu agradecimento de modo particular à minha querida irmã Ariel Moyano, que tem sido a minha companheira constante ao longo de toda a minha vida. Desde os momentos de riso até às lágrimas, passando por brigas e abraços, partilhámos inúmeras experiências, desde festas até noites de filmes e videojogos. Esta ligação que temos é algo que valorizo e guardo com carinho, algo que não trocava por nada neste mundo. Obrigado por seres uma grande confidente, por seres não apenas minha irmã, mas também minha melhor amiga. É uma verdadeira honra ter crescido ao teu lado. Amo-te muito, minha querida irmã. Não há melhor amiga do que uma irmã, e não há melhor irmã do que tu.

Ao meu querido pai Iván Moyano, obrigado por me proporcionares esta oportunidade muito importante na minha vida. Graças a ti, tive o privilégio de conhecer novos lugares e culturas ao longo destes anos, ajudaste-me e impulsionaste-me a alcançar os meus sonhos e a tornar-me Engenheiro Civil. Sei que se diz muito que, para cada pessoa o seu pai é o melhor do mundo, e para mim, és. Estiveste sempre presente para me apoiar emocional e financeiramente, e por isso, muito obrigado, querido pai.

À minha querida mãe Patricia Ayala, quero agradecer-te por me teres dado a vida e por seres um grande apoio. Obrigado por estares presente, por me ouvires e por me amares incondicionalmente. Os teus ensinamentos e amor acompanharam-me em todas as minhas aventuras e viagens, graças a isso consegui tocar corações e crescer como ser humano. Tudo o que sou e tudo o que conquistei deve-se à criação bondosa e amorosa que me proporcionaste. Estou-te totalmente agradecido, mãe querida.

Agradeço ao meu tio Patricio Moyano, que tem sido como um segundo pai para mim. Apesar das preocupações que possam ter surgido devido às minhas viagens de estudo no estrangeiro, ele sempre me apoiou incondicionalmente. Querido tio dedico, também a ti, este trabalho. Obrigado por me apoiares constantemente.

Quero agradecer à minha querida tia Clara Moyano, que tem sido como uma segunda mãe para mim. Obrigado por estares sempre presente, apoiando-me nas decisões mais difíceis, ouvindo-me e dando-me conselhos. Obrigado por me guiares pelo caminho certo. Não existem palavras que possam expressar todo o carinho que tenho por ti, tia querida.

À minha querida avó Balvina Vallejo, dedico este novo feito com todo o meu coração. Apesar de não teres podido estar fisicamente presente nas minhas graduações, sei que de onde estiveres, estás a partilhar este momento de alegria comigo. Lembro-me com carinho de cada momento partilhado contigo durante a minha infância e adolescência, e essas memórias permanecerão gravadas no meu coração para sempre. Sinto muito a tua falta, querida avó, mas sei que estarias orgulhosa das minhas conquistas.

À minha adorada avó Cármen Alvear, que também não pôde estar presente nas minhas graduações, quero expressar o meu profundo carinho. Apesar da sua partida, o seu amor e apoio foram e serão sempre uma constante na minha vida.

Gostaria de estender a minha gratidão à minha tia Anita, cuja bondade, dedicação e cuidado durante a minha infância deixaram uma marca no meu coração. O nosso tempo partilhado será sempre guardado na minha memória. Por isso, estou profundamente grato a ti, tia Anita, por seres uma pessoa tão extraordinária e por enriqueceres o meu caminho.

Quero expressar o meu sincero agradecimento aos meus primos Patricio e Genesis por serem tão incríveis. Sinto-me afortunado por tê-los na minha vida. Além disso, quero reconhecer a minha tia Enma por fazer parte da minha família e por ter partilhado tantos momentos significativos comigo.

A todos os meus amigos incondicionais que me têm apoiado e proporcionado momentos divertidos e experiências inigualáveis.

Resumo

O tema desta dissertação centra-se na procura de alternativas sustentáveis e economicamente viáveis para a construção e manutenção de pavimentos, destacando o uso de resíduos industriais como uma valiosa fonte de materiais. O objetivo principal é explorar a integração desses resíduos em misturas betuminosas a quente para pavimentação, visando encontrar eficiência técnica e reduzir o impacto ambiental.

A pesquisa começa com uma revisão da literatura sobre resíduos industriais disponíveis no mercado e sua aplicação em misturas betuminosas para pavimentos. São analisadas propriedades físico-químicas, bem como resultados de ensaios de laboratório anteriores. Destaca-se o potencial desses materiais para melhorar a sustentabilidade dos pavimentos.

Em seguida é realizada a parte experimental, que inclui a produção de misturas betuminosas a quente para camada de desgaste com betume 35/50 e incorporação de diferentes percentagens de Mistura Betuminosa Recuperada (MBR) assim como a utilização de resíduos da Mina da Panasqueira – agregados grauvaques, em substituição dos agregados graníticos tradicionais. Por fim, procede-se à realização de um conjunto de ensaios mecânicos para avaliar o desempenho dessas misturas, procurando-se a melhor formulação que atenda aos padrões de desempenho necessário, garantindo durabilidade, resistência e estabilidade a longo prazo.

Os resultados mostram que as misturas com incorporação de MBR e utilização dos resíduos da Mina da Panasqueira atendem aos requisitos estabelecidos para sua aplicação em pavimentação, em termos de estabilidade e deformação, de acordo com as especificações das normas portuguesas e europeias. Destaca-se a mistura com 20% de MBR como a mais promissora, com melhor resultado em relação ao ensaio Marshall, sensibilidade à água e deformação permanente, apresentando-se como uma solução viável, ambientalmente sustentável, na construção de pavimentos rodoviários.

Palavras-chave

Mina da Panasqueira, Mistura Betuminosa Recuperada (MBR), Pavimentação Rodoviária, Resíduos industriais, Sustentabilidade.

Abstract

This dissertation focuses on the search for sustainable and economically viable alternatives for the construction and maintenance of pavements, highlighting the use of industrial waste as a valuable source of materials. The main objective is to explore the integration of these wastes into hot asphalt mixtures for paving, aiming to achieve technical efficiency and reduce environmental impact.

The research begins with a literature review on industrial waste available in the market and its application in asphalt mixtures for pavements. The physical-chemical properties are analysed, as well as the results of previous laboratory tests. The potential of these materials to improve pavement sustainability is emphasized.

Next, the experimental part is carried out, which includes the production of hot asphalt mixtures with 35/50 bitumen for the surface layer incorporating different percentages of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) as well as the use of Panasqueira mine waste, replacing traditional granite aggregates. Finally, a set of mechanical tests are carried out to evaluate the performance of these mixtures looking for the formulation that best meets the necessary performance standards, guaranteeing durability, resistance and long-term stability.

The results show that the mixtures incorporating RAP and using Panasqueira mine waste meet the requirements established for their application in paving, in terms of stability and deformation, in accordance with the Portuguese and European standards specifications. The mixture with 20% of RAP stands out as the most promising, with better results concerning the Marshall test, water sensitivity and permanent deformation, presenting itself as a viable, environmentally sustainable solution in the construction of road pavements.

Keywords

Panasqueira mine, Recycled Asphalt Pavement (RAP), Road Pavement, Industrial Waste, Sustainability.

Índice

Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xv
Lista de Acrónimos	xvii
Capítulo 1 – Introdução.....	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Estrutura do trabalho	2
Capítulo 2 - Desenvolvimento Sustentável de Misturas Betuminosas: Incorporação de Resíduos Industriais.....	5
2.1. Enquadramento	5
2.2. Tipos de resíduos industriais.....	6
2.2.1. Misturas betuminosas recuperadas.....	7
2.2.2. Escória de plástico	10
2.2.3. Pó de Vidro	16
2.2.4. Pó de Borracha de Pneu	17
2.2.5. Resíduos de construção e demolição.....	18
2.2.6. Cinzas Volantes de Carvão.....	20
2.2.7. Resíduo de exploração mineira	21
2.2.8. Resíduo de Pedra-Pomes.....	22
2.2.9. Escória de Aço	23
Capítulo 3 – Trabalho experimental	25
3.1. Enquadramento	25
3.2. Caracterização dos materiais utilizados para as misturas betuminosas	26
3.2.1. Agregados	26
3.2.2. Cal hidráulica.....	27
3.2.3. Mistura betuminosa recuperada	28
3.2.1. Ligante betuminoso	29

3.2.2.	Análise Granulométrica.....	30
3.2.3.	Massa Volúmica.....	33
3.3.	Formulação das misturas betuminosas	34
3.3.1.	Composição granulométrica das misturas betuminosas.....	35
3.3.2.	Estimativa do teor de betume inicial.....	37
3.4.	Determinação do teor ótimo de betume	38
3.4.1.	Produção e compactação das misturas betuminosas	39
3.4.2.	Baridade máxima teórica.....	41
3.4.3.	Baridade.....	42
3.4.4.	Porosidade	44
3.4.5.	Vazios na Mistura de Agregados	45
3.4.6.	Vazios preenchidos com betume	46
3.4.7.	Ensaio Marshall.....	47
3.4.8.	Seleção da mistura betuminosa mais adequada.....	50
3.5.	Sensibilidade à água	51
3.6.	Ensaio de módulo de rigidez por tração indireta.....	56
3.7.	Resistência à deformação permanente	57
	Capítulo 4 – Conclusões e Recomendações para trabalhos futuros	65
	Referências bibliográficas	69
	Acervo Normativo.....	83

Lista de Figuras

Figura 1 - Resíduos industriais utilizados na construção de estradas (Elaboração Própria)	7
Figura 2: MBR disponível (adaptado de EAPA, 2021)	8
Figura 3 - MBR disponível: reutilizada, reciclada ou utilizada noutras aplicações (adaptado de EAPA, 2021)	9
Figura 4 – Tipos de resíduos plásticos presentes nos resíduos sólidos urbanos (adaptado de Zhengwu et al., 2022)	13
Figura 5 – Agregados naturais graníticos: (a) Pó de Pedra, (b) Brita 8/16, (c) Brita 15/25 (Elaboração própria)	26
Figura 6 - (a) Pedreira Diamantino Jorge & Filho, agregados grauvaques: (b) brita 2/10, (c) brita 8/14, (d) pó de pedra 0/4 (Elaboração própria)	27
Figura 7 – Agregados grauvaques da Mina da Panasqueira: (a) Pó, (b) brita 2/10, (c) brita 8/14 (Elaboração própria)	27
Figura 8 - Cal hidráulica (Elaboração própria)	28
Figura 9 - Mistura Betuminosa Recuperada (Elaboração própria)	28
Figura 10 - (a) Mufla de ignição, (b) MBR, (c) MBR após queima	30
Figura 11 – (a) Material seco na, (b) peneiros, (c) pesagem de cada peneiro (Elaboração Própria)	31
Figura 12 - Curva granulométrica dos agregados grauvaques: Pó, brita 8/14, brita 2/10, e MBR – (Elaboração Própria)	32
Figura 13 - Curva granulométrica dos agregados naturais graníticos: Pó de Pedra, Brita 8/16, Brita 15/25 (Elaboração própria)	33
Figura 14 - AccuPyc™ 1330 Gas Pycnometer – UBI	33
Figura 15 - Curva Granulométrica da mistura de referência MR	36
Figura 16 - Curva Granulométrica da mistura M15	36
Figura 17 - Curva Granulométrica da mistura M20	37
Figura 18 - Provetes da mistura betuminosa MR	39
Figura 19 - Provetes da mistura betuminosa M15	39
Figura 20 - Provetes de misturas betuminosas M20	39
Figura 21 - (a) Aquecimento dos materiais, (b) Mistura pronta para compactação	40
Figura 22 - (a) Filtro de papel para a base, (b) colocação da mistura no molde, (c) Molde com a mistura	40
Figura 23 – Compactador de impacto	41
Figura 24 - (a) Período de arrefecimento de 4 horas, (b) desmolde dos provetes	41

Figura 25 - Peso de cada provete em condições (a) seco, (b) submerso em água e (c) saturado com superfície seca.....	43
Figura 26 – (a) Banho dos provetes, (b) Máquina de compressão Marshall.....	48
Figura 27 - Curvas de deformação e estabilidade Marshall das misturas betuminosas M15.....	49
Figura 28- Curvas de deformação e estabilidade Marshall das misturas betuminosas M20.....	49
Figura 29 - Provetes cilíndricos para o ensaio de sensibilidade à água das misturas (a) MR, (b) M15 e (c) M20.....	52
Figura 30 - Grupo imerso em recipiente de vácuo.....	53
Figura 31 - Roturas por tração indireta através de compressão diametral: (a) Rotura clara, (b) deformação, (c) combinação (EN 12697 – 23: 2003).....	54
Figura 32 - Provetes ensaiados com falha tipo C	55
Figura 33 - Ensaio de módulo de rigidez por tração indireta.....	56
Figura 34 - Processo de produção das lajetas: (a) Molde para as lajetas, (b) Mistura do material betuminoso, (c) Colocação da mistura no molde.....	58
Figura 35 - (d) Compactação por vibração, (e) Lajeta compactada.....	58
Figura 36 - Lajeta submetida ao ensaio de deformação permanente	60
Figura 37 - Deformação permanente nas lajetas MR, M15 e M20.....	60
Figura 38 - Curva de tendência de deformação das lajetas MR.....	61
Figura 39 - Curva de tendência de deformação das lajetas M15.....	61
Figura 40 - Curva de tendência de deformação das lajetas M20.....	62

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Utilização do plástico como agente modificador de materiais de pavimentação (adaptado de Noor & Muhammad, 2022).....	12
Tabela 2 - Ponto de fusão e ponto de mistura de alguns plásticos (adaptado de Dalhat & Abdul, 2015)	13
Tabela 3 - Benefícios de desempenho da incorporação de plásticos reciclados em misturas betuminosas por meio de processo seco (adaptado de Zhengwu, et al., 2022)	14
Tabela 4 - Benefícios de desempenho da incorporação de plásticos reciclados em misturas betuminosas por meio de processo húmido (adaptado de Zhengwu, et al., 2022).....	15
Tabela 5 - Características do ligante envelhecido extraído da MBR	29
Tabela 6 - Características do betume 35/50.....	29
Tabela 7 - Fuso granulométrico para a camada de desgaste AC14 surf BB (EP, 2014).....	31
Tabela 8 - Análise granulométrica dos materiais utilizados	32
Tabela 9 - Massa volúmica dos materiais utilizados	34
Tabela 10 - Designação das misturas produzidas	35
Tabela 11 - Estudo de composição das misturas betuminosas produzidas.	35
Tabela 12 - Granulometria das misturas betuminosas.....	35
Tabela 13 - Quantidade de betume novo a usar nas misturas betuminosas	38
Tabela 14 - Baridade Máxima Teórica das misturas betuminosas produzidas	42
Tabela 15 - Baridade das misturas MR, M15 e M20 (Média 4 valores).....	44
Tabela 16 - Porosidade das misturas MR, M15 e M20 (média 4 valores)	45
Tabela 17 - Vazios na Mistura de Agregados das misturas MR, M15 e M20 (Média 4 valores)	46
Tabela 18 - Vazios preenchidos com betume nas misturas MR, M15 e M20 (Média 4 valores)	47
Tabela 19 - Estabilidade e deformação das misturas MR, M15 e M20 (Média 4 valores) ..	48
Tabela 20 - Requisitos para AC 14 Surf BB (EP, 2014)	50
Tabela 21 - Resultados obtidos nos ensaios das misturas betuminosas MR, M15 e M20. .	50
Tabela 22 - Baridade e porosidade das amostras secas e imersas das misturas MR, M15 e M20.	52
Tabela 23 - Resistência à tração indireta (média 5 valores) e resistência conservada da tração indireta [%].....	55
Tabela 24 - Baridade, porosidade e Módulo de Rigidez das misturas MR, M15 e M20 (média 5 valores).	57
Tabela 25 - Baridade das lajetas das misturas MR, M15 e M20.....	59

Tabela 26 - Análise comparativa da baridade e porosidade das lajetas e provetes cilíndricos.	59
Tabela 27 - Declive máximo de rodeira (WTS) e profundidade média de rodeira (RD) das misturas.	63

Lista de Acrónimos

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ACR	Agregado de Concreto Reciclado
ASTM	Sociedade Americana de Testes e Materiais
CBR	Índice de Suporte da Califórnia (California Bearing Ratio)
CE	Comissão Europeia
CEPSA	Companhia Espanhola de Petróleos
CMA	Cold Mix Asphalt
CO ₂	Dióxido de Carbono
CSIC	Conselho Superior de Investigações Científicas
DECA	Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura
EAPA	European Asphalt Pavement Association
EN	European Norm
FA	Cinzas Volantes (Fly Ash)
GWP	Pó de Vidro
HDPE	Polietileno de Alta Densidade
HMA	Hot Mix Asphalt
ISO	Organização Internacional de Normalização
ITS	Resistência à Tração Indireta (kPa)
LDPE	Polietileno de Baixa Densidade
MBR	Misturas Betuminosas Recuperadas
MR	Mistura de Referência
NP	Norma Portuguesa
PET	Polietileno Tereftalato
PE	Polietileno
PEX	Polietileno Reticulado
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PVC	Policloreto de Vinil
RAP	Pavimento Asfáltico Reciclado
RCA	Reclaimed Concrete Aggregate
RD	Profundidade da Pegada no Ensaio de Deformação Permanente
RHA	Cinza de Casca de Arroz (Rice Husk Ash)

S.A.	Sociedade Anónima
UBI	Universidade da Beira Interior
UK	Reino Unido
UN	Nações Unidas
USA	Estados Unidos da América
VFB	Vazios nos Agregados Preenchidos com Ligante Betuminoso
VMA	Vazios na Mistura de Agregados
WMA	Warm Mix Asphalt
WTS	Wheel Tracking Slope
WWF	World Wildlife Fund

Capítulo 1 – Introdução

1.1. Enquadramento

Atualmente, a Engenharia rodoviária e a procura de alternativas sustentáveis e economicamente viáveis para a construção e manutenção de pavimentos são de fundamental importância e tornaram-se imperativas para a preservação do meio ambiente. Neste contexto, os resíduos industriais, que são subprodutos de diferentes processos industriais, emergem como uma grande oportunidade e valiosa fonte de materiais que podem ser utilizados na construção de pavimentos. Estes resíduos abrangem uma grande variedade de materiais nos quais podemos encontrar desde cinzas até escórias.

Os resultados versáteis que estes resíduos industriais têm proporcionado em diferentes pesquisas fazem deles recursos de grande valor para substituir materiais convencionais na construção de pavimentos. O uso destes materiais não só promove a sustentabilidade, mas também contribui para reduzir a procura de recursos naturais não renováveis, como os agregados e o solo natural, que são materiais comuns na construção de estradas.

A utilização de resíduos industriais nas misturas betuminosas oferece uma oportunidade para melhorar as propriedades físico-mecânicas dos pavimentos, embora seja essencial levar em conta que esses materiais reciclados podem apresentar diferentes propriedades em comparação com os materiais originais ou naturais, devido aos processos prévios a que foram submetidos e alterados.

Esta estratégia de utilizar resíduos industriais na construção de pavimentos não só responde à necessidade de adotar práticas sustentáveis, mas também está alinhada com os objetivos das Nações Unidas. A promoção da economia circular e do consumo sustentável no setor da construção de estradas tornou-se uma prioridade global, com o propósito de garantir uma infraestrutura resiliente e promover uma industrialização mais amiga do ambiente.

A cooperação internacional desempenha um papel muito importante na mitigação dos impactos ambientais dos resíduos, na promoção, troca de ideias e soluções inovadoras para mitigar os impactos ambientais, neste caso devido aos resíduos. Esta dissertação terá como foco o estudo laboratorial e incorporação de Mistura Betuminosa Recuperada (MBR) e do resíduo de uma exploração mineira como componentes de misturas betuminosas a quente. O uso destes materiais, especialmente a MBR, reduz a dependência de recursos não renováveis ao reutilizar materiais existentes, ajudando a diminuir a pegada de carbono reduzindo, conseqüentemente, as emissões associadas à extração e produção de novos

materiais. Além disso, esta prática ajuda a combater a acumulação de resíduos em aterros sanitários e prolongar o seu uso. Verifica-se ainda que o uso destes materiais otimiza a eficiência económica ao reduzir a energia e os custos associados ao transporte de novos materiais. Em síntese, este estudo destaca-se na adoção de práticas sustentáveis na construção e manutenção de estradas, aproveitando as vantagens ambientais, económicas e sociais oferecidas pelo uso destes materiais reciclados.

1.2. Objetivos

Com a crescente procura de soluções sustentáveis em misturas betuminosas para pavimentação, este trabalho propõe explorar alternativas às misturas convencionais, com foco nas camadas de desgaste para estradas. A formulação dessas misturas incluirá resíduos industriais, com o objetivo não apenas de alcançar eficácia técnica, mas também de reduzir o impacto ambiental. O desempenho dessas misturas será avaliado por meio de ensaios de laboratório, que abrangerão ensaios de sensibilidade à água, rigidez e deformação permanente.

O impulso para este estudo surgiu do contacto estabelecido com a Câmara Municipal da Covilhã, que expressou a necessidade de desenvolver uma mistura de pavimentação específica para o município, especialmente nas regiões montanhosas como a Serra da Estrela. A intenção é utilizar materiais reciclados ou provenientes das Minas da Panasqueira, não apenas para reduzir o impacto ambiental, mas também para impulsionar o turismo e melhorar o acesso das equipas de proteção civil. Além disso, este estudo procura estabelecer uma base para projetos similares em outras regiões do país.

1.3. Estrutura do trabalho

Esta dissertação está estruturada em quatro capítulos, distribuídos da seguinte forma:

O primeiro capítulo, intitulado "Introdução", aborda uma análise preliminar dividida em três seções principais: enquadramento, objetivos do estudo e estrutura geral da tese, além de fornecer uma breve sinopse que resume o conteúdo e o propósito do trabalho de pesquisa em geral.

O segundo capítulo desta dissertação, intitulado "Desenvolvimento Sustentável de Misturas Betuminosas: Incorporação de Resíduos Industriais para Pavimentação de Estradas", concentra-se na investigação de vários resíduos industriais disponíveis no mercado, com especial ênfase nas Misturas Betuminosas Recuperadas (MBR). Este capítulo revisa análises anteriores realizadas por outros investigadores, abordando aspetos como as propriedades físicas e químicas dos materiais, sua origem, pontos de interesse, ensaios realizados, conceitos-chave, bem como os resultados obtidos dos diferentes ensaios de laboratório.

Além disso, são explorados os benefícios da utilização destes materiais na resolução do problema da conservação natural e na promoção do uso de materiais sustentáveis. São apresentadas estatísticas relevantes sobre o uso de Misturas betuminosas recuperadas a nível mundial e é analisado, entre outros aspetos, como estes materiais podem melhorar o desempenho face a cargas e condições de tráfego distintas.

O terceiro capítulo, intitulado "Trabalho Experimental", apresenta uma metodologia de pesquisa experimental, utilizando laboratório. Este enfoque experimental divide-se em três fases. Inicialmente, será realizada a etapa de caracterização dos materiais, incluindo a análise granulométrica conforme a Norma Portuguesa NP EN 933 – 1:2000. A segunda fase, consiste no estudo da formulação de três misturas betuminosas, onde a primeira mistura será produzida apenas com materiais naturais, enquanto a segunda e a terceira misturas serão produzidas com resíduos da Mina da Panasqueira (agregados grauvaques) e 15% e 20% de MBR, respetivamente. Na etapa final, serão realizados ensaios mecânicos: o ensaio para obtenção da densidade e porosidade de acordo com as normas EN 12697 – 41 e EN 12697 – 8. Os ensaios de desempenho do material incluirão o ensaio Marshal EN 12697 – 34 para determinar a estabilidade e deformação, com o objetivo de obter as cargas máximas de resistência. A análise continuará com o ensaio de sensibilidade à água, segundo a norma EN 12697 – 12, seguido pelo ensaio de rigidez de acordo com a norma EN 12697 - 26. Para conclusão da fase experimental, será realizado o ensaio de resistência à deformação permanente sob condições de temperatura e carga repetida, de acordo com a norma EN 12697 – 22. Através destes ensaios de densidade, ensaio Marshal, avaliação de sensibilidade à água, ensaio de rigidez e ensaio de resistência à deformação permanente, procura-se encontrar a melhor formulação de misturas betuminosas que incorporem MBR e resíduos da mina da Panasqueira e, também, que cumpram de forma ótima todos os padrões de qualidade e desempenho necessários para pavimentação. Este processo tem como objetivo garantir a durabilidade, resistência e estabilidade a longo prazo das misturas betuminosas que utilizam MBR, promovendo assim práticas sustentáveis na construção de estradas.

O quarto e último capítulo, intitulado "Conclusões e Trabalhos Futuros", representa o ponto final desta investigação, onde será realizada a análise dos resultados obtidos tanto na pesquisa bibliográfica como nos ensaios de laboratório. Serão consolidadas as conclusões alcançadas ao longo do estudo, destacando os resultados mais significativos e sua relevância para o desenvolvimento sustentável de misturas betuminosas na pavimentação rodoviária. Além disso, será fornecida uma visão de trabalhos futuros, sugerindo áreas, análises e investigações que merecem uma maior atenção, impulsionando a inovação e a aplicação de práticas ambientalmente sustentáveis na construção de estradas.

Capítulo 2 - Desenvolvimento Sustentável de Misturas Betuminosas: Incorporação de Resíduos Industriais

2.1. Enquadramento

Os resíduos industriais são subprodutos derivados de resíduos ou materiais que foram produzidos através de um processo industrial. Estes resíduos podem assumir várias formas: sólida, líquida ou gasosa, e a sua origem pode ser de vários processos industriais, como processos de fabrico, mineração, geração de energia, indústria da construção, entre outros. Entre os diversos materiais podem encontrar-se cinzas, pós, escória, lodo, produtos químicos indesejados, entre outros (Choudhary, Kumar, & Gupta, 2020).

Segundo López Domínguez, Pérez Salazar, & Garnica Anguas (2014), a versatilidade dos materiais industriais reciclados torna-os um recurso valioso que pode ser aproveitado para ser reutilizado na fabricação de pavimentos. Estes resíduos industriais podem ser usados em misturas betuminosas e, assim, melhorar as propriedades físico-mecânicas das mesmas, tendo em conta que estes materiais recuperados têm diferenças em relação aos materiais naturais devido às mudanças que sofreram e alteraram as suas propriedades iniciais.

O uso de resíduos industriais em pavimentos tem um uso sustentável (Kumar Gautam, Pawan, Singh Jethoo, Agrawal, & Singh, 2018). Quando falamos sobre resíduos industriais, podemos encontrar vários tipos, tais como: resíduos de construção, misturas betuminosas recuperadas e resíduos de pedreiras ou minas. Estes materiais são alternativas sustentáveis a materiais não renováveis como agregados, ligantes betuminosos, cimento Portland, cal hidráulica, aditivos e outros tipos de substâncias utilizadas na construção e manutenção de pavimentos.

Tanto a reciclagem como a deposição de resíduos tornaram-se uma preocupação ambiental que suscita preocupação em vários países do mundo (Victory, 2022). O uso de resíduos em pavimentos é uma iniciativa ótima e é fundamental considerar todas estas opções se procuramos um futuro sustentável. Existem vários tipos de resíduos industriais, como resíduos plásticos, resíduos de borracha, resíduos de fibra de vidro, escória de aço, cinzas volantes de carvão, betão triturado, entre outros, que são ótimos para o uso em pavimentos. Estes materiais têm sido estudados em vários ensaios, ao serem utilizados em misturas

betuminosas, produzindo resultados positivos, atuando como modificadores e proporcionando diversas melhorias no desempenho do pavimento.

Com base em Riberito de Rezende, Ramos da Silveira, Lima de Araújo, & Pereira da Luz (2013), a construção e manutenção de estradas geram uma grande procura por recursos naturais não renováveis como agregados e solo natural, o que representa uma carga significativa quando falamos de recursos não renováveis. Em vários países, incluindo o Canadá, a consciencialização sobre o impacto do uso de materiais convencionais para a construção de pavimentos tem aumentado. É por isso importante que os investigadores e profissionais usem materiais recicláveis para avaliar o seu uso na construção de pavimentos.

A utilização de materiais reciclados para pavimentação desempenha um papel importante na promoção da sustentabilidade e contribui, por sua vez, para a economia. Na verdade, todo o ciclo de vida dos materiais de construção de pavimentos, desde a formulação, planeamento, construção e conclusão, envolve vários processos de economia circular e consumo sustentável, alinhando-se com o objetivo 9 das Nações Unidas (ONU) - Construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação (United Nations, 2023). A cooperação internacional é de grande importância para limitar os impactos ambientais dos resíduos e a sua utilização eficaz na indústria da construção de estradas (Marques, Cunha, & Rezende, 2015).

A incorporação de tecnologia sustentável nas fases de construção, manutenção e reabilitação tem aumentado a nível mundial nas últimas décadas. A reciclagem de materiais para a construção de pavimentos minimiza a criação de resíduos e a disposição em aterros. A adoção de materiais reciclados em misturas betuminosas, misturas rígidas de betão e blocos reduz o consumo de energia e as emissões de gases de efeito estufa, dando um salto na luta contra as mudanças climáticas. Neves e Freire (2022), mencionam diferentes trabalhos de investigação que incluem autores de vários países europeus (Bélgica, Finlândia, Itália, Países Baixos, Portugal), África (Nigéria), Ásia (Malásia e Arábia Saudita), Austrália e América do Sul (Brasil e Colômbia).

2.2. Tipos de resíduos industriais

Neste subcapítulo, será realizada uma revisão atualizada sobre a aplicação de resíduos industriais na construção de estradas. Serão estudados os principais resíduos industriais para a construção de pavimentos, a metodologia utilizada em sua reciclagem e os estudos prévios referentes à elaboração desses materiais.

A metodologia e técnicas criadas para a utilização de resíduos estão diretamente ligadas à evolução científica, este processo é baseado em conceitos empíricos que são confirmados

por verificações mediante experimentação *in situ*, o que significa que todos os procedimentos, resultados e conclusões foram realizados através de tentativa e erro (Restrepo Sierra & Stephens Zapata, 2015). Na Figura 1, é apresentado um diagrama dos vários tipos de resíduos industriais utilizados na construção de estradas.

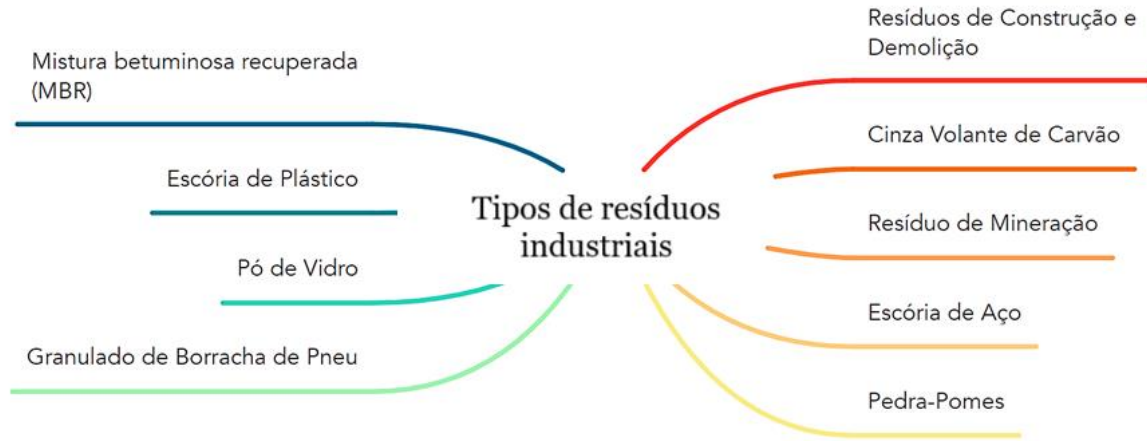


Figura 1 - Resíduos industriais utilizados na construção de estradas (Elaboração Própria)

2.2.1. Misturas betuminosas recuperadas

As misturas betuminosas recuperadas (MBR) são materiais que foram removidos durante a manutenção ou renovação de uma estrada ou via. Estas misturas removidas são compostas por ligante betuminoso, agregados e outros componentes como aditivos, os quais cumpriram a sua função de acordo com as normas de construção e propriedades requeridas, mas, devido ao tempo envelheceram (Zhao & Yang, 2023).

A premissa fundamental das MBR é realizar uma prática de reciclagem e reutilização, incorporando-as em misturas betuminosas novas passando por um tratamento em vez de serem descartadas. Esta prática tem um benefício ambiental e económico importante, ao reduzir a necessidade da utilização de material novo e reduzir a quantidade de material descartado (Barral, Navarro, García Siller, & Cembrero, 2023).

O uso de MBR surge como uma alternativa para a reabilitação de estradas cuja funcionalidade será suportar diferentes cargas, dependendo das propriedades finais da mistura consoante o tipo de agregados e ligante novo utilizado. Outra das vantagens importantes de utilizar este material é o seu baixo custo económico ao reduzir o uso de material novo e, além disso, ser sustentável ambientalmente. Esta metodologia reduz em grande medida o uso de material não renovável, tais como materiais naturais (agregados) e ligante betuminoso e, simultaneamente, reduz a geração de resíduos e a sua consequente ocupação de aterros. Além disso, todos os materiais constituintes das MBR já passaram

anteriormente por um processo de avaliação tendo cumprido as normas de qualidade (Kang, Gupta, Ranaivoson, Siekmeier, & Roberson, 2011).

As características que este material deve ter variam dependendo das normas utilizadas em cada país, assim como o conteúdo de ligante e a rigidez que o pavimento deve ter. Isso denota a importância de levar em conta estes fatores na formulação destas misturas incorporando MBR (Khosla, Nair, Visintine, & Malpass, 2012). O conteúdo de MBR numa mistura betuminosa é considerado um grande influenciador no desempenho da mistura betuminosa final. Em 1997, o grupo de trabalho de especialistas em misturas *Superpave* emitiu uma recomendação para o uso de MBR em pavimentos. Com base nestas diretrizes, é aceitável incorporar até 25% de MBR sem a necessidade de modificar nenhuma das características da mistura. No entanto, quando existe o uso deste material entre 25% e 30%, é necessário reduzir a temperatura de produção em 6°C. Por outro lado, quando se deseja empregar mais de 30% de MBR é necessário avaliar se esta vai interferir na qualidade da mistura final (Alarcón Ibarra, 2015).

Com base em estatísticas realizadas pela *European Asphalt Pavement Association* (EAPA) (2021), dezassete países europeus forneceram dados de asfalto reciclado disponível, entre estes estão: Áustria, Bélgica, Croácia, República Checa, Dinamarca, Finlândia, França, Alemanha, Grã-Bretanha, Hungria, Irlanda, Noruega, Roménia, Eslováquia, Eslovénia, Espanha e Turquia. A quantidade disponível entre todos estes países é de 46,4 milhões de toneladas de material. Na Figura 2, observa-se a quantidade de MBR disponível em diferentes países.

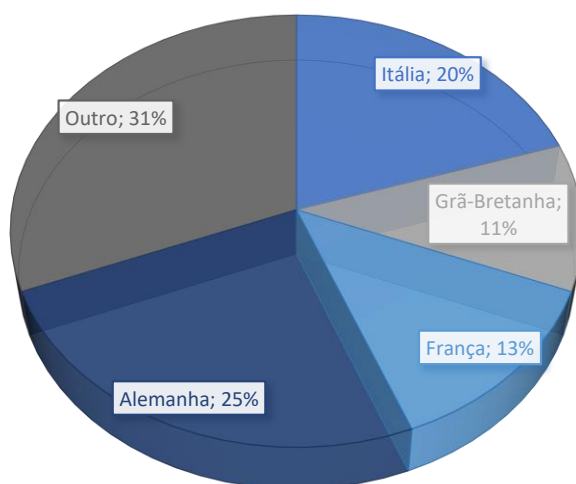


Figura 2: MBR disponível (adaptado de EAPA, 2021)

Verifica-se que a Alemanha tem 11,6 milhões de toneladas (25% do total), a França tem 6 milhões de toneladas (13%), a Grã-Bretanha tem 5 milhões de toneladas (11%) e finalmente estima-se que a Itália tenha 9,5 milhões de toneladas (20%).

As estatísticas realizadas pela mesma organização apresentam a percentagem de MBR utilizado em diferentes misturas, como misturas betuminosas a quente (HMA, do inglês *Hot Mix Asphalt*), misturas betuminosas temperadas (WMA, do inglês *Warm Mix Asphalt*), misturas betuminosas semi-temperadas (Half – WMA, do inglês *Half – Warm Mix Asphalt*) e misturas betuminosas frias (CMA, do inglês *Cold Mix Asphalt*). Além disso, incluem a MBR para aplicação em estradas e outras aplicações na Engenharia Civil. Para a análise estatística, a EAPA utilizou valores específicos fornecidos, abrangendo a quantidade total de MBR e a percentagem utilizada. Estes países incluíram: República Checa, Dinamarca, Finlândia, França, Alemanha, Grã-Bretanha, Hungria, Irlanda, Noruega, Roménia, Eslováquia, Eslovénia, Espanha e Turquia. Com base em todos estes países, foram registadas 27,4 milhões de toneladas de MBR, das quais 64% foram reutilizadas, 33% foram recicladas e 3% foram reutilizadas para aplicações não identificadas ou eliminadas em aterros, como apresentado na Figura 3 (EAPA, 2021).

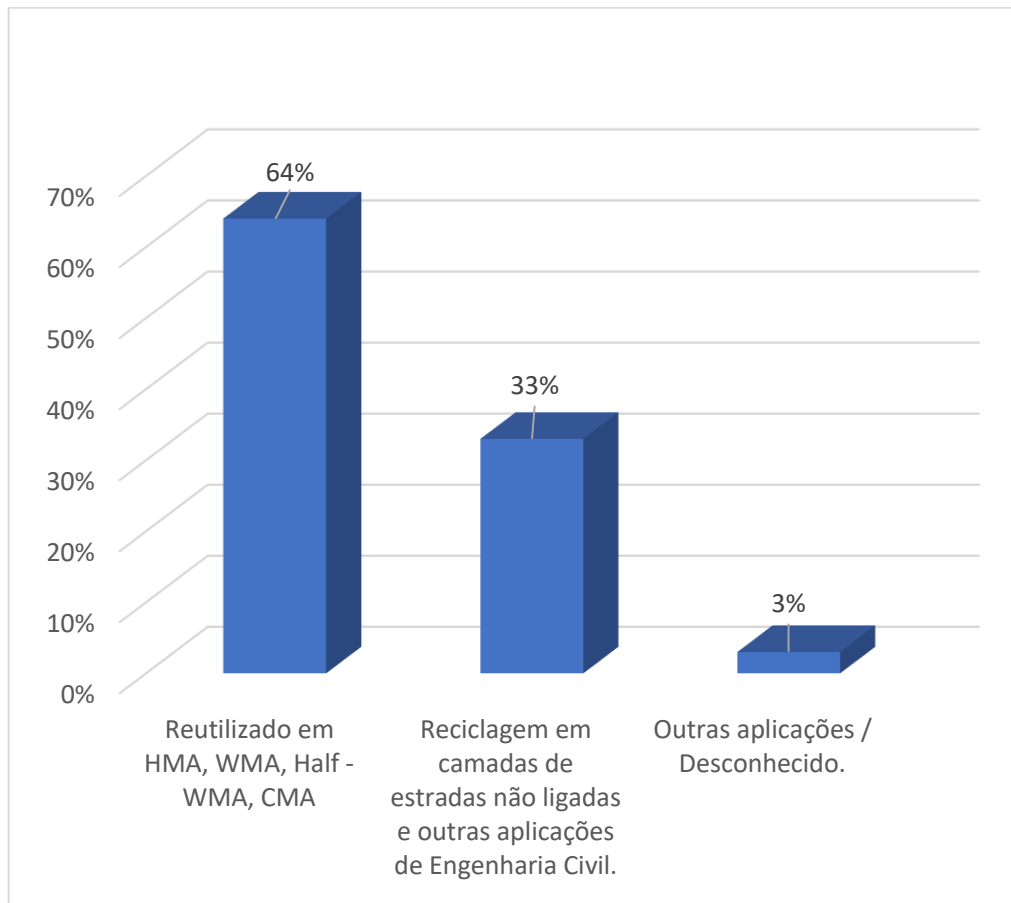


Figura 3 - MBR disponível: reutilizada, reciclada ou utilizada noutras aplicações (adaptado de EAPA, 2021)

É importante conhecer a diferença entre reutilização e reciclagem de MBR. A reutilização envolve reintegrar a MBR numa nova mistura, utilizando os agregados e o ligante betuminoso envelhecido para desempenhar novamente a função para a qual foram inicialmente aplicados. Enquanto, a reciclagem envolve usar a MBR para uma camada de

base, enchimento ou material para estradas, onde os agregados e o ligante betuminoso envelhecido desempenham uma função menor ou são utilizados para outra função em comparação com a original. Neste caso, o termo reciclagem tem sido usado erroneamente para se referir a operações de reutilização (EAPA, 2021).

Com base em Genesseeaux López (2015), o primeiro passo no processo de utilização de MBR é obter o material e, posteriormente, ser submetido a um processo onde o material será classificado e as impurezas serão eliminadas, garantindo qualidade requerida nas especificações. Uma vez realizado este procedimento, será feita a trituração e o fracionamento do material, onde o mesmo sofrerá uma redução de tamanho em suas partículas, tornando mais fácil a utilização do material e assim garantir uma distribuição uniforme na fabricação das novas misturas betuminosas (Nandal, Sood, & Kumar Gupta, 2023). Posteriormente, o material triturado deve passar por um processo de estudo granulométrico, o que é fundamental para a realização de uma adequada formulação da mistura betuminosa, assegurando uma distribuição uniforme na mistura e garantindo uma boa qualidade da mistura final.

2.2.2. Escória de plástico

A produção de plástico aumentou exponencialmente ao longo dos últimos anos, chegando atualmente a um valor de 300 milhões de toneladas de resíduos plásticos por ano afetando o meio ambiente em diferentes aspectos: vida marinha, poluição dos oceanos e da água, poluição do solo e vegetação, sendo a China, Indonésia, Filipinas, Tailândia e Vietname os países mais poluentes (Chang Guo, Xie-Mi, Zhang, & Lin, 2023).

Os resíduos plásticos representam 95% dos resíduos poluentes despejados no Mar Mediterrâneo, provenientes principalmente da Turquia, Espanha, Itália, Egito e França. A Europa é o segundo maior produtor de resíduos plásticos, despejando entre 150 mil e 500 mil toneladas de macrolásticos e um total de 70 mil e 130 mil toneladas de microplásticos por ano no Mar Mediterrâneo. Outro dado preocupante é a gestão dos resíduos plásticos em todo o mundo, onde apenas um terço do valor de 27 milhões de toneladas é reciclado na Europa. Isso tem causado uma diminuição em termos económicos, de cerca de 61,7 milhões de euros, da frota pesqueira da União Europeia e uma diminuição do turismo em praias contaminadas (World Wildlife Fund, 2018).

Kubiczek, Derej, Hadasik e Matuszewska (2023) apresentam uma perspectiva que destaca vários pontos para diminuir e melhorar a gestão e o uso do plástico, através da reciclagem de resíduos plásticos, abordando vários benefícios para a economia circular ao converter esse material descartado em componentes de combustível reutilizável. Por outro lado, segundo (Chang Guo, Xie-Mi, Zhang, & Lin, 2023), sugere-se a incorporação do plástico

reciclado na produção de betão, influenciando diferentes propriedades do material, como físicas, químicas, mecânicas, durabilidade, entre outras. O uso de plástico reciclado em misturas betuminosas tem sido uma prática utilizada há várias décadas, desde meados do século XIX, melhorando o comportamento mecânico das misturas betuminosas e o seu impacto ambiental (Jia Boom, et al., 2023).

Na Tabela 1 apresenta-se uma síntese da utilização do plástico como agente modificador em misturas betuminosas.

O uso e pesquisa sobre a integração de material plástico reciclado como aditivo em misturas betuminosas na construção de infraestruturas viárias não é um campo novo para a indústria e tem perdurado ao longo de vários anos (Salem, 2014). Várias pesquisas têm sido feitas relativamente às aplicações deste resíduo plástico em diversas formas para estruturas viárias com resultados positivos. No entanto, a maior parte das pesquisas tem-se centrado num tipo de pavimento, o pavimento betuminoso flexível, principalmente para uso na camada de sub-base (Vasudevan, Chandra Sekar, Sundarakannan, & Velkennedy, 2012). Os pavimentos flexíveis representam cerca de 95% das vias de transporte em todo o mundo enfrentando diversos desafios, como, fissuras devido à fadiga, deformações devido à carga de veículos, desprendimentos e buracos. A incorporação de resíduos plásticos aparece como uma alternativa para melhorar o desempenho desses pavimentos flexíveis e também abordar o problema dos resíduos plásticos. O processo envolve a trituração do plástico e sua incorporação nos agregados numa percentagem entre 6% e 10% (Zhengwu, et al., 2022), misturando com betume e utilizando a mistura na construção de rodovias. São destacadas várias melhorias no desempenho da estrutura viária, como rigidez, resistência ao desprendimento e influência da sensibilidade à água (Noor & Muhammad, 2022).

As incorporações dos resíduos plásticos nas misturas betuminosas dividem-se em duas categorias principais: processo húmido e processo seco. No processo húmido, o betume é modificado com resíduos plásticos, enquanto que no processo seco os resíduos plásticos são utilizados para substituir uma parte dos agregados da mistura betuminosa. É importante salientar que as partículas de plástico devem ser semelhantes às partículas dos agregados (Santos, Fonseca, Almeida, & Capitaio, 2020). A eficácia na escolha e na utilização do plástico reciclado assim como a tecnologia aplicada é de grande importância para a durabilidade e desempenho do pavimento. Estes ajustes requerem um estudo aprofundado das propriedades termomecânicas das misturas betuminosas. A escolha do material ideal baseia-se na disponibilidade de equipamentos de produção, indicadores de desempenho dos materiais, os tipos de resíduos plásticos utilizáveis e a mistura betuminosa específica que se pretende criar, entre diferentes parâmetros que devem ser considerados, tais como

condições climáticas, tipo de plástico utilizado, tamanho e forma dos resíduos, tipo de betume, temperatura de mistura, custo, etc. (Noor & Muhammad, 2022).

Tabela 1 - Utilização do plástico como agente modificador de materiais de pavimentação (adaptado de Noor & Muhammad, 2022)

Ano	Autor	Descrição	Referência
1843	D.C. Thompson & A.J. Hoiberg	Obteve a primeira patente para uso de polímero virgem como modificador de betume	(Yildirim, 2007)
1993	Flynn, L	Usou polipropileno (PP) e polietileno (PE) reciclados separadamente como modificadores no betume, usando o processo húmido	(L., 1993)
1997	H.U. Bahia	47 dos 50 estados dos EUA aprovaram e expressam uma atitude positiva em relação ao uso de aglutinante modificado com polímero	(Bahia, Perdomo, & Turner, 1997)
2002	O. Gonzalez	Explorou a interação entre polímero e betume para compreender a melhoria nas propriedades do ligante	(Gonzalez, et al., 2022)
2006	R. Vasudevan	Usou plástico para formar um revestimento em agregados para melhorar a capacidade de ligação, usando o processo seco	(Vasudevan, Chandra Sekar, Sundarakannan, & Velkennedy, 2002)
2011	E. Ahmadinia et al.	Modificaram o processo convencional para obter melhor desempenho após a integração do plástico nas misturas betuminosas	(Ahmadinia E. , Zargar, Rehan, Abdelaziz, & Shafigh, 2011)
2015	S. Vanitha et al.	Usou resíduos sólidos de plástico para substituir agregados em betão	(Vanitha, Venugopal, & Omprakaash, 2015)
2016	J. Jafar	Abordou a questão da má adesão entre a superfície plástica e o betume com o objetivo de facilitar a substituição parcial de agregados nas misturas betuminosas	(Jafar, 2016)
2018	Z. Leng et al.	Foi introduzida MBR juntamente com plástico para substituir uma grande parte do ligante betuminoso	(Leng, Sreeram, Kumar Padhan, & Tan, 2018)
2019	D. M. Quesada et al.	Usaram uma combinação de vários tipos de plástico reciclado como aditivo para melhorar a mistura betuminosa	(Movilla - Quesada, et al., 2019)
2020	S. Haider et al.	Investigaram o impacto de vários modificadores plásticos na mistura betuminosa com o objetivo de identificar a propriedade influenciada por cada modificador específico	(Haider, Hafeez, Jamal, Ullah, & Rafi, 2020)
2021	G. B. Melkamu et al.	Ajustaram os parâmetros de modificação de forma ideal para um caso específico, procurando tornar a modificação prática e eficaz para as condições específicas de uma estrada em particular	(Birlie Genet, Barantie Sendekie, & Lemessa Jembere, 2023)
2022	Linyi Yao et al.	Analisaram os aspetos económicos e ambientais relacionados com a modificação do betume através da inclusão do plástico reciclado	(Linyi, Lan, Chen, & Jiang, 2022)

Na Figura 4, apresentam-se os tipos de resíduos plásticos encontrados nos resíduos sólidos urbanos, com base num estudo de uso municipal deste desperdício.

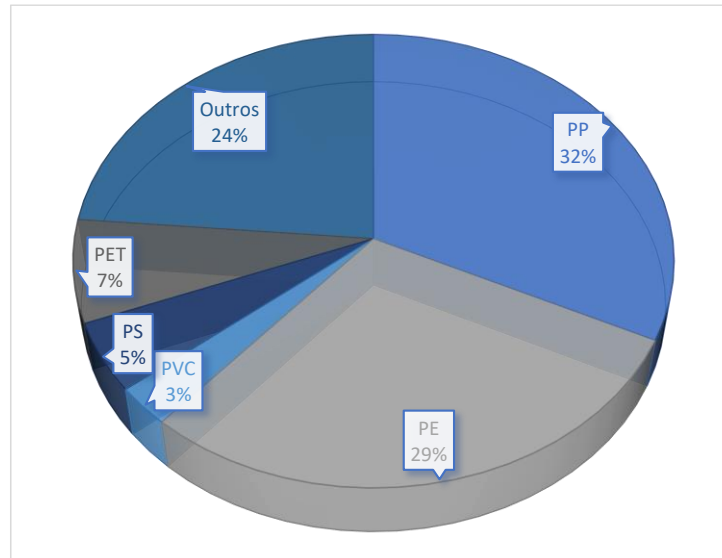


Figura 4 – Tipos de resíduos plásticos presentes nos resíduos sólidos urbanos (adaptado de Zhengwu et al., 2022)

Como se pode observar, os principais tipos de plásticos são o polipropileno (PP), polietileno (PE), Policloreto de vinilo (PVC), Poliestireno (PS), Polietileno Tereftalato (PET) e outros tipos não identificados (Zhengwu, et al., 2022). O estudo das propriedades termomecânicas é de suma importância ao implementar plástico reciclado. A Tabela 2 apresenta os pontos de fusão dos diferentes tipos de plástico e os pontos de mistura (temperatura em que o plástico se mistura efetivamente com o material betuminoso), conforme os estudos realizados por Dalhat e Al-Abdul Wahhab (2015).

Tabela 2 - Ponto de fusão e ponto de mistura de alguns plásticos (adaptado de Dalhat & Al-Abdul, 2015)

Plástico Reciclado	Ponto de fusão [°C]	Ponto de mistura [°C]
Polietileno Tereftalato (PET)	250	-
Polietileno de alta densidade (HDPE)	132	180
Policloreto de vinil (PVC)	298	-
Polietileno de Baixa Densidade (LDPE)	110	160
Polipropileno (PP)	162	190
Poliestireno (PS)	> 100	-

Dalhat e Al – Abdul Wahhab (2015), descrevem o uso de plásticos reciclados com pontos de fusão abaixo de 200°C, catalogando essa temperatura como ideal para a realização de misturas betuminosas com alguns desses produtos. Isso deve-se ao facto de que a exposição prolongada ao calor faz com que o material oxide e envelheça (Fang, Yu, Zhang, & Hu, 2012). Neste estudo, os materiais LDPE, HDPE e PP são considerados os plásticos mais

adequados em relação ao ponto de fusão. As temperaturas de mistura adequadas para esses materiais devem ser superiores ao ponto de fusão, como podemos observar para cada material na tabela 2.

O uso de plástico tem contribuído para melhorias no desempenho mecânico das misturas betuminosas a quente. Tanto na incorporação de plástico pelo método seco quanto pelo método húmido, observou-se uma melhoria na resistência às deformações plásticas e permanentes, estabilidade Marshal, bem como nos vazios totais e propriedades de ligação da mistura asfáltica (Maniruzzaman, Rahman, Hainin, & Wan Abu, 2015), aumentando sua afinidade com o betume e melhorando as suas propriedades, minimizando assim os danos causados pela água (Borges Miranda, Rato, & Domingues, 2023). Também foram observadas grandes melhorias em propriedades como fadiga, elasticidade, rigidez, resistência à tração, entre outras (Zhengwu, et al., 2022). Na Tabela 3 apresenta-se uma análise dos benefícios de vários plásticos comuns utilizados em misturas betuminosas, pelo método seco, e a tabela 4 apresenta resíduos plásticos utilizados em misturas betuminosas pelo método húmido.

Tabela 3 - Benefícios de desempenho da incorporação de plásticos reciclados em misturas betuminosas por meio de processo seco (adaptado de Zhengwu, et al., 2022)

Polietileno Tereftalato (PET) (Lugeiyamu, Kunlin, Mensahn, & Faraz, 2021)	<ul style="list-style-type: none"> - Melhora a resistência contra danos causados pela humidade - Aumenta a resistência da fadiga - Melhora o módulo de rigidez em temperaturas baixas e médias de serviço
Polietileno Reticulado (PEX) (Costa, Peralta, Oliveira, & Silva, 2017)	<ul style="list-style-type: none"> - Melhora a resistência à deformação permanente - Reduz a densidade das misturas
Polietileno Reciclado (PE) (Angelone, Cauhapé, Borghi, & Martinez, 2015)	<ul style="list-style-type: none"> - Aumenta a estabilidade das misturas - Aumenta a resistência à fadiga - Satisfaz os requisitos relacionados com a suscetibilidade à humidade - Melhora a resistência à deformação permanente
Polietileno de baixa densidade (LDPE) (Almeida, Capitao, Bandeira, Fonseca, & Santos, 2020)	<ul style="list-style-type: none"> - Satisfaz os requisitos relacionados à suscetibilidade à humidade - Melhora a resistência à compactação por tráfego - Melhora a rigidez - Melhora a resistência à deformação por fadiga

Tabela 4 - Benefícios de desempenho da incorporação de plásticos reciclados em misturas betuminosas por meio de processo húmido (adaptado de Zhengwu, et al., 2022)

Tipo de Plástico	Benefício de Desempenho
Polietileno Tereftalato (PET) (Ahmadinia E. , Zargar, Rehan, Abdelaziz, & Shafigh, 2011)	<ul style="list-style-type: none"> - Maior resistência à fadiga - Melhora as propriedades de elasticidade e recuperação - Aumento da rigidez da mistura - Melhora a resistência às deformações permanentes - Aumento dos valores do módulo resiliente
Polietileno Reciclado (RPE) (Fuentes - Audén, et al., 2008)	<ul style="list-style-type: none"> - Melhora as propriedades em temperaturas de serviço médias - Melhora a suscetibilidade térmica
Polietileno (PE) (Kamada & Yamada, 2002)	<ul style="list-style-type: none"> - Melhora a estabilidade térmica - Melhora a resistência a deformação - Maior resistência à fadiga - Menor suscetibilidade ao envelhecimento, temperatura e aumento da durabilidade
Polietileno de Baixa Densidade (LDPE) (Attaellmanan, Feng, & Ai, 2011)	<ul style="list-style-type: none"> - Melhora a resistência a deformação - Melhora a resistência a tração indireta - Melhora a resistência ao cisalhamento a temperaturas médias e altas - Reduz a suscetibilidade térmica do betume - Melhora os valores de rigidez e módulo de rotura
Polipropileno (PP) (Ibrahim Al-Hadidy)	<ul style="list-style-type: none"> - Melhora a resistência ao cisalhamento a temperaturas médias a altas - Melhora a resistência à deformação - Melhora o desempenho do ligante em viscosidade (rigidez) - Diminui a suscetibilidade térmica do betume - Aumenta a estabilidade Marshall, rigidez Marshall e densidade
Polietileno de alta densidade (HDPE) (Al - Hadidy & Yi - qui, 2009)	<ul style="list-style-type: none"> - Melhora a resistência ao cisalhamento a temperaturas médias a altas - Melhora a resistência a deformações permanentes - Aumenta a rigidez e módulo de rotura das misturas a baixa temperatura (-10°C) - Aumenta os valores do módulo resiliente a altas temperaturas (25°C) - Reduz a suscetibilidade térmica do betume
Poliuretano (PU) (Al - Hadidy & Yi - qui, 2009)	<ul style="list-style-type: none"> - Reduz a penetração do ligante para uso em estradas de tráfego pesado

A incorporação de resíduos plásticos em misturas betuminosas, em geral, além de trazer grandes benefícios às suas propriedades, também apresenta uma perspetiva encorajadora para lidar com desafios ambientais e económicos, reduzindo a emissão de gases e prevenindo a acumulação de resíduos em aterros e nos oceanos (Vasudevan, Chandra Sekar, Sundarakannan, & Velkennedy, 2002). Por outro lado, também temos a redução da presença destes resíduos nos sistemas de drenagem (Sojobi, Emeka, & Oluwasegun, 2016). Finalmente, para a utilização de plástico em misturas betuminosas quentes devem ser

considerados vários fatores, tais como, os efeitos ambientais, os efeitos de custo e o impacto na mistura betuminosa (Cetin, Tuncan, & Tuncan, 2003).

2.2.3. Pó de Vidro

O vidro representa uma grande parte dos materiais reciclados com origem na manutenção e reconstrução de edifícios, vidros de automóveis, artigos de cristal e contentores de reciclagem de resíduos (Arulrajah, Younis Ali, & Disfani, 2013). O vidro, assim como o plástico, é um material que não se decompõe num curto período de tempo podendo ser eliminado enterrando-o no solo. A propriedade de fragilidade que o vidro possui torna-o num material de fácil manuseio podendo ser reduzido a partículas de diferentes tamanhos sem necessidade de processos químicos para posterior incorporação em misturas betuminosas (Gedik, 2021). A percentagem de resíduos de vidro representa uma proporção significativa em relação ao total de resíduos no mundo.

O uso de vidro reciclado é uma prática adequada para criar misturas betuminosas sustentáveis com maior durabilidade, resistência ao deslizamento (Maghool, Arulrajah, Ghorbani, & Suksun, 2022), capacidade de carga, sensibilidade à água e ductilidade (Abedeh, 2017), além de, em comparação com o uso de vidro criado a partir de areia de pedreira natural e vidro triturado reciclado, reduzir a percentagem de uso de material natural em 46,7% (Tushar, et al., 2023). Por esta razão, é importante a gestão adequada dos resíduos de vidro e a separação de resíduos na classificação de contentores de reciclagem.

Em função do método de processamento utilizado para trituração, o vidro reciclado pode adotar três apresentações diferentes: grossa, intermédia e fina. Embora o vidro na apresentação grossa raramente seja utilizado na construção de estradas, as suas variantes intermédia e fina são amplamente utilizadas para esse fim. Geometricamente, quanto mais grossas forem as partículas de vidro, mais irregulares e angulares serão, enquanto sua apresentação fina visualmente se assemelha a um agregado natural como o pó de pedra (Disfani, Arulrajah, & Bo, 2012). Pesquisas e ensaios laboratoriais revelaram que o uso deste resíduo numa fração fina é eficaz na melhoria das propriedades mecânicas em misturas betuminosas quentes. Para classificar esses materiais em fração fina, média ou grossa, as partículas de vidro triturado têm 4,75, 9,50 e 19,00 mm, respetivamente (Anupiya, et al., 2021). Além disso, tem sido reconhecido como uma boa alternativa económica na composição de materiais para sub-base (Alam, Arulrajah, & Ali, 2012). A literatura destaca que a incorporação limitada de vidro reciclado em misturas viárias se deve à falta de compreensão do comportamento que esse material tem em diferentes aplicações no pavimento (Yonus Ali, Newman, Arulrajah, & Disfani, 2011). No entanto, resultados favoráveis foram obtidos ao empregar este material na camada de desgaste numa proporção

de 10 a 15%, desde que não ultrapasse os 4,75 mm de tamanho das partículas, para garantir a segurança dos usuários e veículos nas rodovias (Huang, Roger, & Hidrich, 2007).

A inclusão de vidro no pavimento registou várias vantagens com melhorias na segurança viária, como consequência do aumento da resistência ao deslizamento, devido à força de abrasão, que expõe as partículas de vidro à superfície. Além disso, foi destacado que durante a noite as partículas de vidro refletem luz proporcionando benefícios adicionais para a segurança viária. Resultados positivos foram obtidos com base num estudo realizado durante um ano, que avaliou o desempenho de uma mistura contendo 10% de vidro revelando que a superfície do pavimento não apresentou sinais de deformação, exceto pelo aparecimento de pequenas fissuras (Su & Chen, 2002).

2.2.4. Pó de Borracha de Pneu

A obtenção de pó de borracha é feita através de pneus reciclados, onde é realizado um processo de trituração de pneus danificados, com o objetivo de reduzir o tamanho das partículas. Este procedimento pode ser realizado por duas metodologias: a primeira baseia-se na trituração a temperatura ambiente ou na trituração dos pneus humedecidos a temperatura ambiente, e a segunda é realizada em temperaturas criogénicas, ou seja, abaixo de -150 °C ou temperaturas de congelação (Shu & Huang, 2014). A poluição devido à abundância de pneus e sua deposição em ambientes urbanos gera uma grande preocupação, além dos custos para eliminar os pneus e evitar o seu depósito em aterros sanitários serem elevados. Uma das soluções propostas para o uso desse material é incorporá-lo na produção de misturas betuminosas para a construção de estradas ou pavimentos. Embora a prática de usar borracha granulada em pavimentos tenha produzido resultados positivos, ainda continuam a ser realizados ensaios de modo a avaliar a influência da incorporação deste resíduo no comportamento nos pavimentos (Mashaan & Karim, 2014).

Na construção de pavimentos betuminosos destacam-se dois diferentes modos para a utilização de pneus reciclados, os métodos seco e húmido, que diferem na forma de incorporar o pneu triturado na mistura betuminosa quente. Ambos os métodos procuram melhorar as propriedades e o desempenho da mistura betuminosa (Huang, Roger, & Hidrich, 2007). No método húmido, o material reciclado é misturado com o ligante betuminoso, o que gera uma modificação e melhoria nas propriedades do ligante natural. Por outro lado, a metodologia a seco tem como objetivo substituir 1 a 3% de agregado fino pelo resíduo de pneu reciclado (Xu, et al., 2023).

O uso de borracha triturada, seja processada pelo método seco ou húmido, apresenta várias vantagens além da melhoria na resistência ao deslizamento. Também proporciona às misturas betuminosas uma alta resistência ao cisalhamento, um fator favorável para

suportar as cargas de tráfego e prevenir formação de sulcos ou deformações longitudinais na superfície da estrada (Huang, Roger, & Hidrich, 2007). Além disso, observa-se uma redução na absorção de água, à medida que o material de borracha reciclada aumenta (Adesina & Das, 2021). Outros benefícios do uso desse material incluem a melhoria da resistência à fadiga, o aumento da estabilidade e da resistência ao desprendimento da mistura betuminosa, quando se emprega até 10% de borracha reciclada (Mashaan & Karim, 2014). A adição de borracha reciclada no ligante betuminoso até 30% tem demonstrado melhorias em propriedades como resistência às intempéries e desprendimento (Huang, Roger, & Hidrich, 2007).

Com base em vários estudos (Tuncan, Tuncan, & Cetin, 2003) foram observadas mudanças significativas ao incluir borracha triturada no betume natural, sendo as principais mudanças benéficas na viscosidade e na suscetibilidade à temperatura. Foram realizados vários ensaios laboratoriais para analisar o impacto do tamanho e da quantidade ideal para o desempenho da mistura betuminosa a quente. Três granulometrias diferentes foram estudadas: 4,75 – 0,85 mm, 0,85 – 0,075 mm e 4,75 – 0,075 mm com uma taxa de 5%, 10% e 20% do total de betume, respectivamente. Os melhores resultados, em termos de ensaio de tração indireta, estabilidade Marshall, resistência à compressão e desprendimento, foram obtidos para a mistura com borracha triturada com tamanho 4,75 - 0,075 mm e com uma taxa de incorporação de 20%. Além disso, foram realizados testes adicionais de penetração, amolecimento e ductilidade. O tamanho das partículas de borracha afetou o valor de penetração, observando-se que, quanto menor o tamanho das partículas de borracha, maior a penetração verificada. Os resultados também confirmaram que a incorporação de borracha triturada endurece a mistura betuminosa melhorando a viscosidade e a suscetibilidade às mudanças térmicas.

O betume modificado com o resíduo de borracha tem sido de grande interesse na Engenharia rodoviária devido ao seu excelente desempenho em serviço de estradas desde que a quantidade de conteúdo de borracha granulada seja baixa, entre 5% e 10%. Verificou-se que um alto conteúdo de borracha pode dificultar a compactação da mistura e reduzir a estabilidade à água obtendo-se uma viscosidade excessiva, mas em taxas baixas pode melhorar a durabilidade do pavimento (Duan, et al., 2022).

2.2.5. Resíduos de construção e demolição

Os resíduos de construção e demolição (RCD) são materiais provenientes da construção, reabilitação, demolição e desmantelamento de estruturas. Os materiais que podem ser reciclados incluem betão, tijolos, vidro, plástico, entre outros componentes de construção. Com base em diversos estudos (Moschen-Schimek, Kasper, & Huber - Humer, 2023),

determinou-se que os RCD constituem aproximadamente 36% dos resíduos gerados na União Europeia. Os RCD gerados na Austrália e nos Estados Unidos representam aproximadamente 20 e 140 milhões de toneladas, respetivamente, enquanto na Europa o número é superior a 850 milhões de toneladas. Isso significa que na UE cada pessoa gera por ano entre 0,5 e 1 tonelada destes resíduos (Cedik, 2020).

O agregado reciclado de betão é gerado como um subproduto do esmagamento de resíduos de betão em atividades de reconstrução e manutenção de estruturas viárias (Paranavithana & Mohajerani, 2006). Em termos gerais, o betão é o resíduo com a maior proporção quando há processos de demolição. O uso de betão reciclado não apenas aborda os desafios gerados pela eliminação desses resíduos, mas também reduz o uso dos materiais naturais limitados que são utilizados na construção de estradas. Sua aplicação varia entre o uso em misturas betuminosas quentes e a aplicação na camada base e sub-base (El - Assaly & Ellis, 2009).

Ao usar o agregado reciclado de betão em misturas betuminosas observou-se um aumento na densidade e absorção de água, ou seja, a inclusão desse material resulta num pavimento final com alta porosidade e, portanto, mais suscetível a danos causados pela água. Além disso, a resistência e durabilidade diminuem à medida que se aumenta a percentagem deste resíduo (Rahman, Mohajerani, & Giustozzi, 2020). A utilização exclusiva de agregado reciclado de betão em misturas betuminosas não tem proporcionado bons resultados. No entanto, a sua combinação com incorporação de MBR resulta num desempenho eficiente. Um estudo realizado em Espanha (Herrador, Pérez, Garach, & Ordóñez García, 2011) incorporou agregado reciclado de betão com MBR e resíduos cerâmicos em proporções de 75%, 20% e 5%, respetivamente, realizando testes de compactação, consistência e abrasão do material, demonstrando que a qualidade dessas misturas pode ser comparável às misturas com agregados naturais. Além disso, o uso desses materiais resultou numa melhoria na resistência final da mistura.

Os resíduos de argila triturada e os resíduos cerâmicos, provenientes de demolições e atividades de construção, também oferecem uma alternativa sustentável aos agregados naturais usados na construção de estradas. O resíduo cerâmico geralmente é obtido de loiças sanitárias, cujo material é triturado para reduzir o tamanho das partículas, sendo adequados como materiais granulares na construção de pavimentos (Cameron, Azam, & Rahman, 2012). O uso de resíduo cerâmico teve resultados favoráveis no módulo de resiliência, sugerindo uma boa capacidade para cargas repetidas. Por outro lado, o método de abrasão de Los Angeles com misturas que incluíam 100% desse material não cumpriu os requisitos do ensaio sugerindo-se que seja utilizado em proporções menores para atender aos requisitos específicos do projeto e da resistência ao desgaste (Arisha, Gabr, El - Baday, & Shwalli, 2016).

Em resumo, a gestão e o uso desses materiais requerem um estudo cuidadoso quanto às proporções e ao uso de outros aditivos, bem como aos padrões do projeto de forma a otimizar o seu desempenho e contribuir para a sustentabilidade na indústria da construção de pavimentos.

2.2.6. Cinzas Volantes de Carvão

O produto residual da combustão do carvão é conhecido como cinza volante gerada pela queima de compostos de carvão para a geração de energia em centrais termoelétricas (Tuncan, Tuncan, & Cetin, 2003). O carvão contém uma grande quantidade de cinzas, que, quando queimado, produz essa cinza volante que é descartada em aterros. O uso deste material não só reduz a necessidade de usar aterros sanitários, mas também diminui os impactos ambientais que este gera na água, alteração do solo e impactos na saúde humana (Sahafi, Al Nageim, & Visulios, 2013). O uso moderado de metais pesados na cinza volante (Paseto & Baldo, 2012) e suas partículas ultrafinas fazem com que o uso deste material mineral como enchimento para a construção de estradas seja uma prática adequada (Athanasopouloi, 2014). Dependendo dos compostos químicos presentes na cinza, a *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) e a *American Society for Testing and Materials* (ASTM) classificaram a cinza volante em dois tipos, tipo C e tipo E, onde o tipo C tem um alto teor de cálcio e o tipo E tem um teor reduzido de cálcio (Athanasopouloi, 2014).

O uso de subprodutos derivados de resíduos de carvão, como a cinza volante gerada pela combustão do carvão, na indústria da Engenharia, tem ganhado popularidade na construção de estradas. Essa prática tem sido sustentada por pesquisas e ensaios de qualidade em laboratório (Modarres & Ayar, 2015). Diversos estudos têm corroborado as vantagens do uso de cinzas volantes nas propriedades e na qualidade da mistura betuminosa (Tran & Phan, 2024).

De acordo com Tran & Phan (2024) a incorporação de 30% de cinzas volantes nas misturas betuminosas permite a obtenção de um aumento da sua resistência mecânica. De facto, a combinação de cimento, cinza volante e sílica com 30% de cinza volante, 0,5 a 1,5% de sílica, mostrou propriedades de compressão, flexão, módulo de elasticidade e resistência à abrasão superiores em comparação com outras concentrações. Outra vantagem, assim como a de outros resíduos, é a de diminuir o consumo de energia e as emissões de CO₂ ao longo do ciclo de vida do pavimento (Zhao & Yang, 2023).

2.2.7. Resíduo de exploração mineira

O resíduo gerado por explorações mineiras pode ter origem em locais de exploração de minerais como carvão, ferro, cobre, alumínio, prata, chumbo, sal, fosfato, mármore, ouro, entre outros. A prática da mineração é de grande importância para a economia global, mas, devido ao facto de ser uma das principais fontes de poluição no planeta, é importante procurar uma perspectiva mais ecológica. Os resíduos obtidos pela exploração mineira servem para conservar os recursos naturais e diminuir os impactos ambientais (Segui, Mahdi, Amrani, & Mostafa, 2023). As propriedades mecânicas e químicas desses materiais dependem de vários fatores, como o tipo de rocha no local da escavação mineira, o tipo de processo de extração e os locais de depósito (Segui, Mahdi, Amrani, & Mostafa, 2023). Os resíduos rochosos das explorações mineiras são considerados substitutos adequados para uso e construção de estradas, pois não passaram por nenhum tipo de procedimento químico ou físico na mina, além da própria escavação. Os resíduos mineiros são divididos em grão grosso, com tamanho superior a 2 mm geralmente depositados a céu aberto, e resíduos de grão fino, caracterizados por terem um tamanho entre 0,063 mm e 2 mm (Blight, 2011).

Vários estudos de caracterização das propriedades físicas e mecânicas das partículas dos resíduos rochosos têm sido realizados, tais como, absorção de água, ensaios de consistência e ensaios de impacto (Taha, Benarchid, & Benzaazoua, 2021). Com base na análise granulométrica, após remover todas as partículas maiores que 20 mm, obteve-se uma distribuição de partículas adequada para as camadas de desgaste, base e sub-base do pavimento. Por outro lado, o material analisado mostrou-se impermeável, com apenas uma taxa de absorção de água de 0,39%. É importante considerar que as propriedades e granulometria das partículas dependem diretamente do tipo de rocha, devendo sempre ser realizado um estudo prévio.

O tungsténio é um tipo de metal que pode ser encontrado em diferentes minerais na natureza e pode ser obtido de minas de volfrâmio. Este material tem uma excelente resistência à corrosão. O uso deste material na construção de pavimentos betuminosos pode melhorar a durabilidade e a segurança da estrada, podendo ser usado como uma solução para a termorregulação (Si, et al., 2022). Estes materiais também podem melhorar a resistência mecânica das misturas, o que pode contribuir para melhorar as propriedades reológicas (viscosidade, elasticidade, flexibilidade, resistência ao corte, módulo de elasticidade, resistência à fadiga) e o desempenho geral da estrutura do pavimento (Zhang, et al., 2023). Uma das minas mais importantes não apenas na Europa, mas uma das poucas existentes a nível mundial, é a Mina de Panasqueira, esta mina é uma das maiores produtoras de volfrâmio. O Couto Mineiro da Panasqueira situa-se na Beira Baixa, localizando-se nos concelhos da Covilhã, Fundão e Pampilhosa da Serra, Portugal. O

depósito mineral desta mina abrange uma grande quantidade de quartzo e uma rica concentração de tungstênio, conhecidos pela sua excelente qualidade e tamanho. Esta mina conseguiu fazer parte do museu nacional de história natural e ciência (Museu Nacional de História Natural e da Ciência, 2004). O Couto Mineiro da Panasqueira está situado em pleno Maciço Hespérico, com formação rochosa que apresenta uma sequência tipo *flysch*, de xistos, arcoses e grauvaques chamada “complexo das Beiras” ou “complexo xisto-grauváquico” pertencente à Zona Centro-Ibérica (ZCI) (Antão, 2001). O resíduo da Mina Panasqueira é assim constituído essencialmente por partículas de quartzo e grauvaque. O resíduo da exploração mineira da Panasqueira foi utilizado no estudo experimental para produção de misturas betuminosas apresentado no capítulo seguinte.

2.2.8. Resíduo de Pedra-Pomes

A pedra-pomes é uma rocha vulcânica que se forma quando a lava possui um alto conteúdo de gás que arrefece rapidamente, resultando num material com textura leve e porosa, composto principalmente por sílica e alumina. A pedra-pomes, quando finamente pulverizada, é conhecida como púmice, um material caracterizado por ter uma textura porosa e vítrea. A aplicação deste material na construção de estradas ainda está em fase de estudo. O uso deste material tem sido especialmente analisado para camadas de base e estabilidade de sub-base (Saltaan & Findik, 2008), tendo-se mostrado especialmente eficiente como material de enchimento em misturas betuminosas quentes (Saltan, Kavlak, & Ertem, 2011).

Na Turquia foram realizadas várias pesquisas e ensaios, nos quais foi avaliado o uso de púmice. Estes resultados foram comparados com materiais de enchimento convencionais em misturas betuminosas quentes, tendo revelado um aumento na estabilidade da mistura e uma diminuição no ligante betuminoso. Outro estudo determinou que este material não deve ser utilizado por si só, pois não atende a muitos dos requisitos preconizados nas especificações. Por exemplo, este material com tamanho igual ou menor a 3 mm, carecia de boa plasticidade e resistência ao corte comparada com uma rocha padrão apresentando um valor de CBR inferior ao necessário. No estudo realizado por Saltaan & Findik (2008) sugere-se que este material deve ser misturado com outro com alto teor de argila para reduzir a plasticidade e ser um agente estabilizante na mistura (Saltaan & Findik, 2008). Por outro lado, foi realizado um estudo no qual a pedra-pomes tinha um maior teor de argila, e foram utilizadas diferentes percentagens, 10%, 20%, 30% e 40%. A utilização de 40% de pedra-pomes melhorou consideravelmente os valores de CBR em relação ao estudo anterior cumprindo os padrões de qualidade para a construção de pavimentos (Saltan, Kavlak, & Ertem, 2011).

2.2.9. Escória de Aço

A escória de aço é gerada nas fábricas de aço quando a cal é misturada com o minério de ferro. A qualidade da escória depende da qualidade do aço que se está a produzir. A escória de aço facilmente supera muitos dos resíduos reutilizáveis devido à sua fácil recolha nas fábricas e ao padrão de controlo de qualidade. Para classificar a escória de aço é necessário estudar a sua composição química e o seu processo de arrefecimento (El - Assaly & Ellis, 2009). A escória geralmente é classificada em dois grupos, escórias metalúrgicas e fosfóricas. A escória metalúrgica subdivide-se em aço ferroso e não ferroso, sendo a escória ferrosa um material de cor negra obtido em processos de alto forno (Krayushkina, Prentkovskis, Bieliatynskyi, & Junevicius, 2012). Por outro lado, a escória obtida na fundição de aço é uma mistura composta por silicatos e óxidos, que no processo de arrefecimento endurece e converte-se em material sólido de alta resistência (Asi, Qasrawi, & Shalabi, 2007).

A escória de aço, além de ser utilizada em misturas betuminosas a quente, tem sido um componente com grandes benefícios em projetos de estabilização de solos (El - Assaly & Ellis, 2009). Estudos realizados no Reino Unido verificaram a rentabilidade deste material, mostrando que 98% é reutilizado em diferentes aplicações, incluindo a sua incorporação como agregado na construção (Huang, Roger, & Hidrich, 2007). Nos EUA são reutilizadas em projetos de construção de estradas entre 50% e 70% das 10 a 15 milhões de toneladas de escória de aço geradas (Paseto & Baldo, 2012). A China é outro país que gera anualmente grandes quantidades de escória de aço, aproximadamente 17 milhões de toneladas. Globalmente, 50 milhões de toneladas desta escória são produzidas como subproduto. Outros países apresentam os seguintes dados: na Grécia, 1,6 milhões de toneladas; no Irão, 3 milhões de toneladas; na Letónia, entre 100 e 200 mil toneladas; no Brasil, 3 milhões de toneladas; e na Europa, 12 milhões de toneladas são geradas. Na Alemanha, mais de 90% deste material é reutilizado. Este material é utilizado na produção de betão, cimento, estabilização de solos, como material fertilizante, tratamento de águas residuais, agricultura, entre outros (Rondón, Muniz, & Reyes, 2017).

De acordo com o estudo realizado por Krayushkina, Prentkovskis, Bieliatynskyi e Junevicius (2012), este material utilizado na construção de estradas tem proporcionado grandes benefícios, como resistência à humidade e resistência ao deslizamento. No entanto, o uso deste material tem gerado alguma preocupação devido à sua propriedade de expansão. Outros estudos indicaram que o uso de escória de aço em misturas betuminosas a quente aumenta a durabilidade das mesmas. A mistura betuminosa foi produzida com um ligante modificado com polímeros, calcário e agregados finos, melhorando também a resistência à deformação. Os ensaios de resistência à fadiga em vários ciclos de carga, com estudo da

deformação vertical, apresentaram resultados positivos, melhorando a resistência com o aumento do uso de escória de aço na mistura betuminosa até um valor máximo de 75% deste material (Huang, Roger, & Hidrich, 2007). Na Turquia, foram realizadas análises de escória de aço classificada granulometricamente como material grosseiro, em quatro misturas betuminosas a quente produzidas com dois ligantes betuminosos diferentes; os ensaios utilizados foram tração indireta, ensaios de fluência e ensaios de estabilidade Marshal. Os resultados destes ensaios indicaram que este material melhorou todas as propriedades mecânicas nessas misturas betuminosas (Ahmedzade & Sengoz, 2009).

Em resumo, a escória de aço, demonstra ser um material vantajoso com benefícios ambientais e económicos. O seu uso na construção de estradas, na estabilização de solos e em outras aplicações destaca a sua versatilidade.

Capítulo 3 – Trabalho experimental

3.1. Enquadramento

Nesta secção da dissertação, será apresentado todo o trabalho experimental. Este capítulo divide-se em três fases distintas. Inicialmente, será realizada a etapa de caracterização dos materiais, incluindo a análise granulométrica conforme a Norma Portuguesa NP EN 933 – 1:2000. A segunda fase consiste na formulação de três misturas betuminosas diferentes, com variações nos agregados, cal hidráulica, Mistura Betuminosa Recuperada (MBR) e betume, tendo por base a execução do ensaio Marshal, segundo a norma EN 12697 – 34, para determinar a estabilidade e a deformação, com o propósito de obter as formulações adequadas. Na etapa final, serão realizados ensaios de determinação das propriedades das misturas betuminosas, tais como, densidade, segundo a norma EN 12697 - 41 e porosidade, seguindo as diretrizes da norma EN 12697 – 8. Os ensaios de desempenho das misturas incluirão o ensaio de sensibilidade à água, conforme a norma EN 12697 – 12, seguido pelo ensaio de rigidez (Tração Indireta) segundo a norma EN 12697 - 26. Concluindo a fase experimental, será realizado o ensaio de Wheel Tracking ou resistência à deformação permanente sob condições de carga e temperatura repetidas, conforme a norma EN 12697 – 22.

Neste trabalho experimental serão realizadas três formulações de misturas betuminosas. Na primeira formulação, denominada mistura de referência, serão utilizados agregados naturais, cal e betume. A segunda formulação incluirá 15% de MBR combinada com cal e agregados grauaques resíduos provenientes da exploração mineira da Panasqueira. Finalmente, a terceira formulação caracterizar-se-á por ter 20% de MBR, juntamente com cal e agregados grauaques resíduos obtidos da mesma exploração mineira.

O objetivo desta análise é comparar as propriedades mecânicas entre a mistura de referência e as misturas que incorporam 15% e 20% de MBR e resíduo da exploração mineira, tendo em conta o desempenho e a sustentabilidade. Simultaneamente, escolher a melhor formulação para uma mistura betuminosa quente incorporando MBR e resíduo para ser aplicada numa camada de desgaste.

3.2. Caracterização dos materiais utilizados para as misturas betuminosas

Os materiais utilizados nas misturas betuminosas produzidas no presente estudo incorporam diferentes materiais: agregados naturais, agregados resíduos da exploração mineira da Panasqueira, mistura betuminosa recuperada (MBR), betume e cal hidráulica.

3.2.1. Agregados

Os agregados que devem ser utilizados em qualquer mistura betuminosa devem cumprir determinadas condições de qualidade, entre as quais o tamanho de partículas e granulometria ideais para garantir uma compactação ótima e uma interação eficaz entre os agregados e o ligante betuminoso. Além disso, esses agregados devem estar livres de qualquer contaminante físico ou químico, impurezas e outros materiais como argila, poeira, material orgânico, entre outros.

Para este estudo, dependendo da formulação do material, serão utilizados agregado natural granítico e agregado grauvaque resíduo da Mina da Panasqueira.

- Agregados Naturais

Os agregados naturais graníticos utilizados nas misturas betuminosas de referência são de três tipos: brita 8/16 fornecida pela empresa Diamantino Jorge & Filhos, localizada em Castelo Branco, brita 15/25 e pó de pedra, materiais fornecidos pela Pedreira da Capinha, no concelho do Fundão. Os agregados naturais encontram-se apresentados na Figura 5.

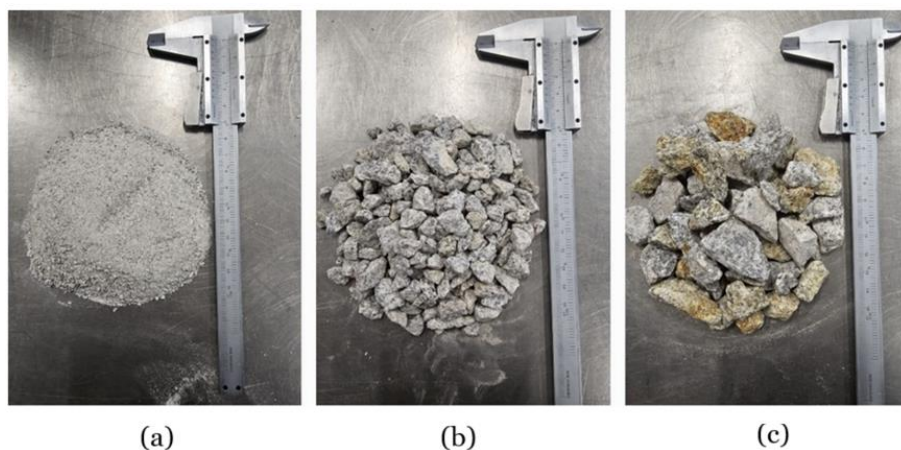


Figura 5 – Agregados naturais graníticos: (a) Pó de Pedra, (b) Brita 8/16, (c) Brita 15/25 (Elaboração própria)

- Resíduos da Mina da Panasqueira

Os resíduos da Mina da Panasqueira, agregados grauvaques, utilizaram-se para produzir as misturas betuminosas com 15% e 20% de MBR sendo de 3 tipos: pó de pedra 0/4, brita 2/10 e brita 8/14, material fornecido pela empresa Diamantino Jorge & Filhos, proveniente da escombreira de exploração mineira de Panasqueira, Covilhã, apresentados na Figura 6 e Figura 7.

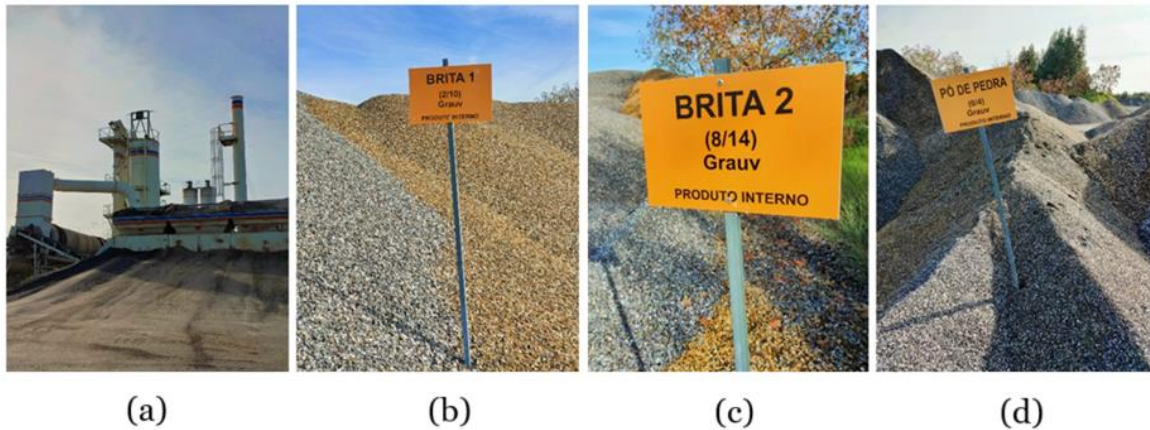


Figura 6 - (a) Pedreira Diamantino Jorge & Filho, agregados grauvaques: (b) brita 2/10, (c) brita 8/14, (d) pó de pedra 0/4 (Elaboração própria).

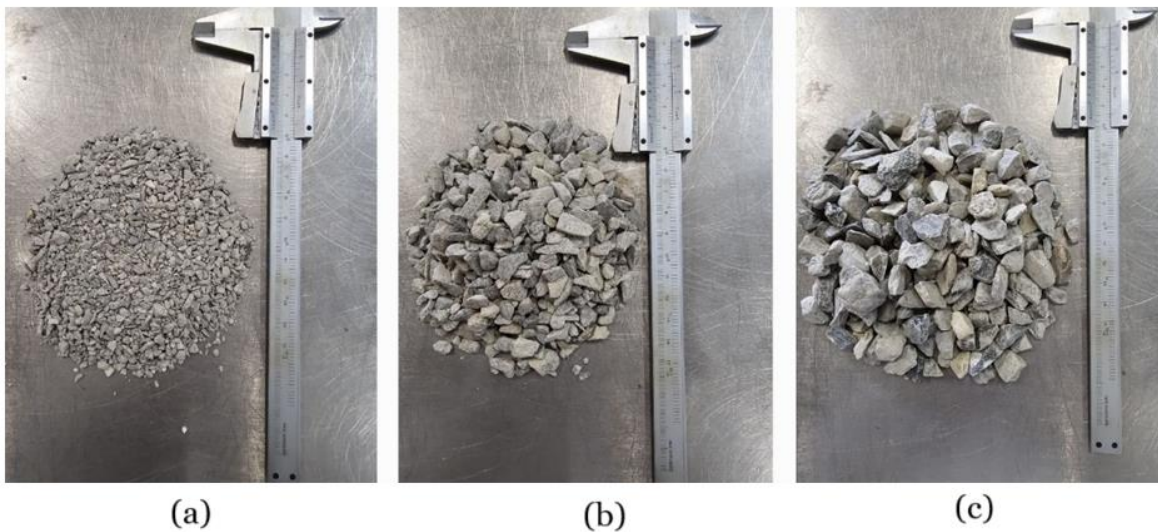


Figura 7 – Agregados grauvaques da Mina da Panasqueira: (a) Pó, (b) brita 2/10, (c) brita 8/14 (Elaboração própria).

3.2.2. Cal hidráulica

De acordo com Bilgen e Altuntas (2023), o uso de cal hidráulica serve como estabilizador, proporcionando uma melhor coesão, resistência às cargas de tráfego intenso e evitando a fissuração do pavimento. Além de contribuir significativamente para a coesão, também melhora a durabilidade e a estabilidade da estrutura do pavimento, especialmente quando são utilizados pavimentos ou materiais reciclados. Outro fator importante que melhora com

o uso da Cal Hidráulica são as deformações permanentes. A cal hidráulica que se utilizou no trabalho experimental tem a designação comercial de MARTIGANÇA HL5 da empresa SECIL, apresentada na Figura 8.



Figura 8 - Cal hidráulica (Elaboração própria).

3.2.3. Mistura betuminosa recuperada

O presente estudo utiliza Mistura Betuminosa Recuperada (MBR), apresentada na Figura 9, material que foi extraído da autoestrada A23, localizada em Castelo Branco - Portugal.



Figura 9 - Mistura Betuminosa Recuperada (Elaboração própria)

A caracterização deste material foi realizada pela empresa CEPESA Betumes, no Laboratório de Madrid, nomeadamente a determinação do teor de betume envelhecido com base na norma EN 12697-1:2000, assim como a penetração e ponto de amolecimento segundo as normas EN 1426 e EN 1427, respetivamente. Os resultados apresentam-se na Tabela 5.

Tabela 5 - Características do ligante envelhecido extraído da MBR

Propriedades	Norma	Resultados
Ligante envelhecido extraído [%]	EN 12697-1:2000	5,6
Penetração [mm]	EN 1426	11
Temperatura de amolecimento [°C]	EN 1427	77,8

Considerando os resultados apresentados, conclui-se que o betume envelhecido extraído da MBR tem um alto grau de envelhecimento. A reduzida penetração sugere uma rigidez alta e, portanto, uma perda da sua elasticidade original.

3.2.1. Ligante betuminoso

Conforme o manual de pavimentação (Cepsa Portuguesa Petróleos S.A., 2006.), o ligante betuminoso desempenha uma função importante nas misturas betuminosas, unindo os agregados, além de proporcionar coesão e estabilidade às misturas. Os ligantes betuminosos permitem a obtenção de uma mistura flexível, que se adapta a deformações e assentamentos nas camadas do pavimento. Em Portugal, na produção das misturas betuminosas a quente, utilizam-se betumes com uma classificação de penetração de 35/50 e 50/70 para as misturas betuminosas consideradas "tradicionais", as quais conferem propriedades ótimas para a aplicação. Para esta dissertação, utilizaremos um betume 35/50, fornecido pela Cepsa Petróleos, S.A., sendo ideal para a elaboração de camadas de desgaste, que requerem temperaturas de fabricação entre 162°C e 166°C, com temperaturas de compactação situadas numa faixa de 152°C e 156°C. A sua aplicação destaca-se não apenas pela adaptabilidade às condições climáticas do local de instalação do pavimento, mas também pelo seu desempenho nos testes de penetração. Na Tabela 6 apresentam-se as características do Betume 35/50.

Tabela 6 - Características do betume 35/50

Ensaio	Norma	Betume 35/50
Penetração a 25 °C, 100 gr., 5 segundos [mm]	EN 1426	46
Ponto de amolecimento [°C]	EN 1427	50,8

3.2.2. Análise Granulométrica

A caracterização granulométrica dos agregados naturais, agregados resíduos da Mina da Panasqueira, cal e Mistura Betuminosa Recuperada, realizou-se com base na Norma Portuguesa NP EN 933-1:2000, através do método de peneiração.

Para a realização da análise granulométrica da MBR procedeu-se, previamente, à extração de betume por queima utilizando uma Mufla de ignição Troxler NTO. Este processo, ilustrado na Figura 10, é realizado para obter o agregado sem o ligante betuminoso.

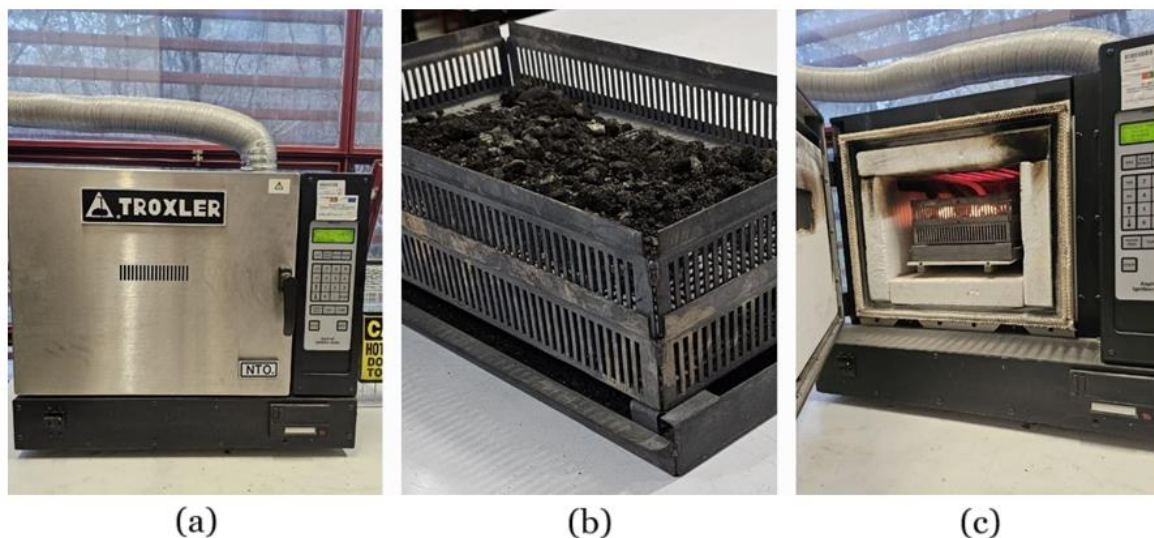


Figura 10 - (a) Mufla de ignição, (b) MBR, (c) MBR após queima

Para a realização da análise granulométrica dos restantes agregados os ensaios foram efetuados de acordo com o preconizado na norma NP EN 933-1:2000, tendo sido colocados em estufa por 24 horas a uma temperatura de 110 ± 5 °C. Posteriormente, colocou-se o material num conjunto de peneiros ordenados de forma decrescente quanto à abertura da malha e procedeu-se a sua agitação de forma mecânica por um período de 5 minutos. No final, procedeu-se à pesagem de cada um dos peneiros, de modo a obter o peso do material retido. O procedimento encontra-se ilustrado na Figura 11.

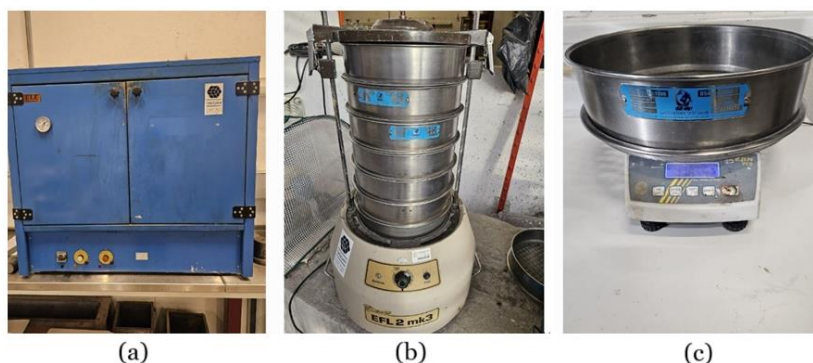


Figura 11 – (a) Material seco na, (b) peneiros, (c) pesagem de cada peneiro (Elaboração Própria)

O conjunto de peneiros utilizado foi selecionado de acordo com o definido no Caderno de Encargos Tipo Obra das Estradas de Portugal, S.A. (EP, 2014) para uma mistura AC14 surf (BB) a ser aplicada numa camada de desgaste, apresentando-se o fuso granulométrico na Tabela 7.

Tabela 7 - Fuso granulométrico para a camada de desgaste AC14 surf BB (EP, 2014)

Abertura dos Peneiros [mm]	AC 14 surf BB	
	Limite Inferior	Limite Superior
20	100	100
14	90	100
10	67	77
4	40	52
2	25	40
0,5	11	19
0,125	6	10
0,063	5	8

Na Tabela 8 e nas Figuras 12 e 13 apresentam-se os resultados da análise granulométrica de todos os materiais utilizados neste estudo experimental.

Tabela 8 - Análise granulométrica dos materiais utilizados

Abertura dos peneiros	% Acumulada passados							
	Pó de Pedra	Brita 8/16	Brita 15/25	Pó Grauaque 0/4	Brita 2/10	Brita 8/14	MBR A23	Cal Hidráulica
20	100	100	100	100	100	100	100	100
14	100	96	96	100	100	96	98	100
10	100	61	37	100	96	37	91	100
4	100	7	1	93	17	1	74	100
2	85	5	1	41	3	1	56	100
0,5	44	1	1	6	2	1	21	100
0,125	14	0	0	1	1	0	5	100
0,063	5	0	0	0	0	0	0	100

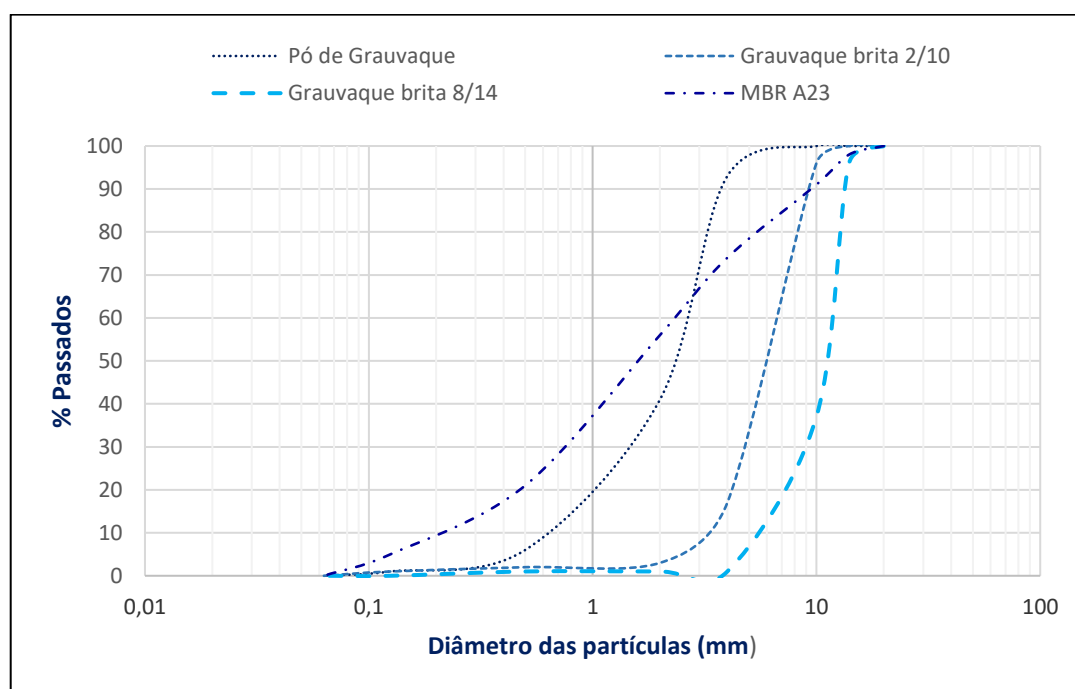


Figura 12 - Curva granulométrica dos agregados grauaques: Pó, brita 8/14, brita 2/10, e MBR – (Elaboração Própria)

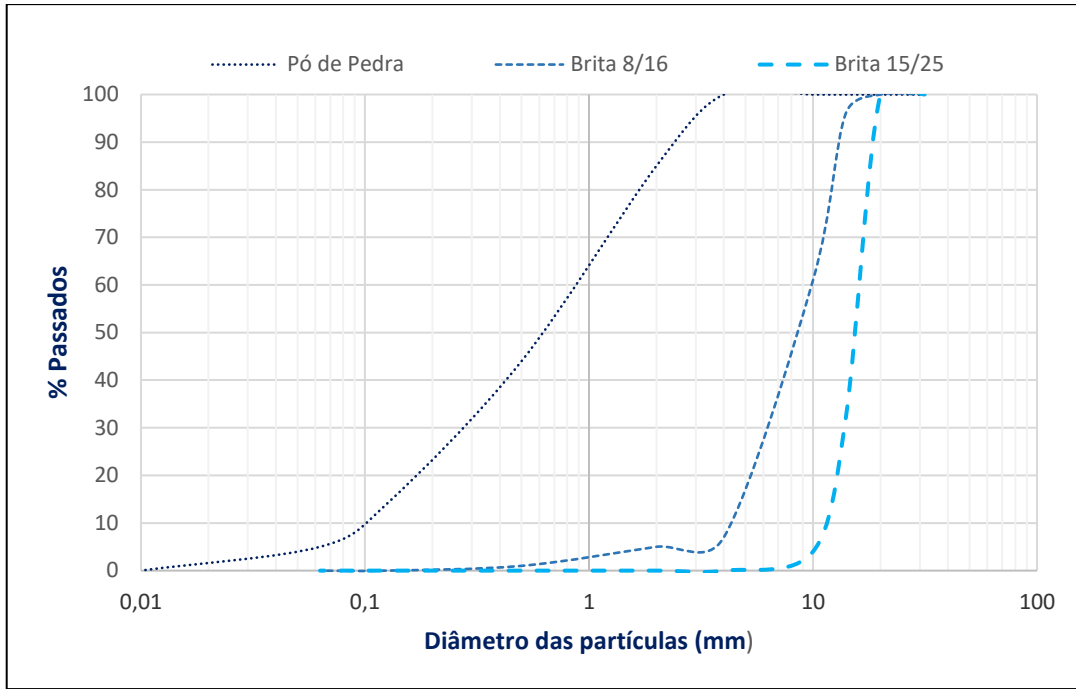


Figura 13 - Curva granulométrica dos agregados naturais graníticos: Pó de Pedra, Brita 8/16, Brita 15/25 (Elaboração própria)

3.2.3. Massa Volúmica

A massa volúmica dos agregados naturais, resíduo da Mina da Panasqueira, cal hidráulica e MBR determinou-se de acordo com a Norma Portuguesa EN 1097-6:2003, tendo sido utilizado o método do picnómetro de hélio com o equipamento AccuPyc™ 1330 Gas Pycnometer, apresentado na Figura 14.



Figura 14 - AccuPyc™ 1330 Gas Pycnometer – UBI

Para a avaliação e determinação da massa volúmica dos materiais, foram realizadas três medições para cada amostra, sendo considerado o valor médio obtido apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 - Massa volúmica dos materiais utilizados

Material	Massa Volúmica [kg/m³]
Pó de Pedra	2690
Brita 8/16	2650
Brita 15/25	2670
Pó de Grauaque 0/4	2830
Grauaque brita 2/10	2830
Grauaque brita 8/14	2810
Cal Hidráulica	2760
MBR	2500

3.3. Formulação das misturas betuminosas

Na formulação de misturas betuminosas visa-se obter a percentagem de materiais (agregados, cal hidráulica e MBR) que cumpra o fuso granulométrico para a camada de desgaste AC14 surf BB, conforme especificado no Caderno de Encargos Tipo Obra das Estradas de Portugal, S.A. Como mencionado anteriormente, neste estudo experimental foram realizadas 3 misturas betuminosas distintas para camada de desgaste. A primeira formulação, chamada mistura de referência, incorporará agregados naturais, cal e betume. Nesta mistura são utilizados apenas agregados tradicionais. A segunda formulação incluirá 15% de MBR combinado com cal e agregados provenientes de exploração mineira (Grauaques da Mina da Panasqueira). Por fim, a terceira formulação caracterizar-se-á por ter 20% de MBR, juntamente com cal e agregados obtidos de exploração mineira (Grauaques da Mina da Panasqueira). Na Tabela 10 apresentam-se as designações adotadas para cada mistura. A taxa máxima de incorporação de MBR em camadas de desgaste é de 10% (EP, 2014). No entanto, na tentativa de encontrar uma mistura mais sustentável, e tal como referido na Caderno de Encargos Tipo da Estradas de Portugal, esta percentagem pode aumentar desde que justificada pelo estudo de formulação. Assim, optou-se por fazer um estudo com 15 e 20% de MBR.

Tabela 10 - Designação das misturas produzidas

Tipo de Mistura	Designação
Mistura de referência com 100% de agregados naturais	MR
Mistura com 15% de MBR e agregados grauaques da Mina da Panasqueira	M15
Mistura com 20% de MBR e agregados grauaques da Mina da Panasqueira	M20

3.3.1. Composição granulométrica das misturas betuminosas

Na tabela 11 apresenta-se o estudo de composição das misturas betuminosas produzidas em laboratório.

Tabela 11 - Estudo de composição das misturas betuminosas produzidas.

Material	MR [%]	M15 [%]	M20 [%]
Pó de Pedra	35	-	-
Brita 8/16	62	-	-
Brita 15/25	-	-	-
Pó de Grauaque 0/4	-	28	20
Grauaque brita 2/10	-	16	17
Grauaque brita 8/14	-	35	35
Cal Hidráulica	3	15	20
MBR A23	-	6	8

Na Tabela 12 apresentam-se os resultados da composição granulométrica das misturas betuminosas produzidas. Nas Figuras 15, 16 e 17, encontram-se representadas as curvas granulométricas das misturas MR, M15 e M20, respetivamente, assim como o fuso granulométrico estabelecido para uma camada de desgaste do tipo AC14 Surf (BB).

Tabela 12 - Granulometria das misturas betuminosas.

Abertura dos Peneiros [mm]	Limite Inferior	Limite Superior	% Acumulada passados		
			MR	M15	M20
20	100	100	100	100	100
14	90	100	98	98	98
10	67	77	76	76	75
4	40	52	42	46	45
2	25	40	36	27	28
0,5	11	19	19	12	14
0,125	6	10	8	7	9
0,063	5	8	5	6	8

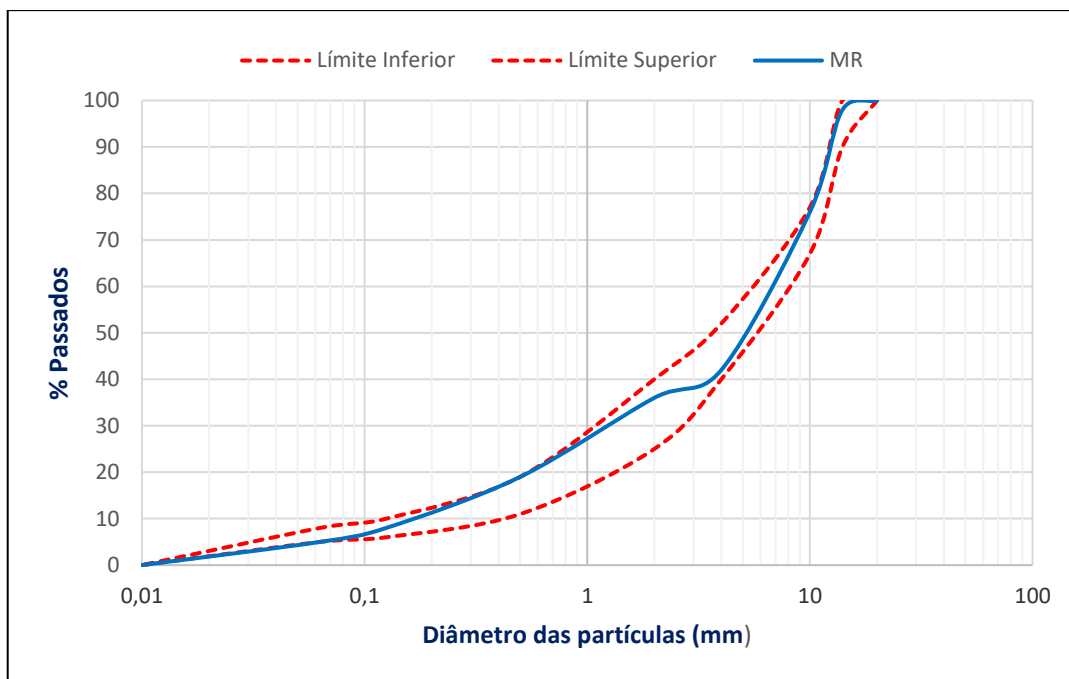


Figura 15 - Curva Granulométrica da mistura de referência MR

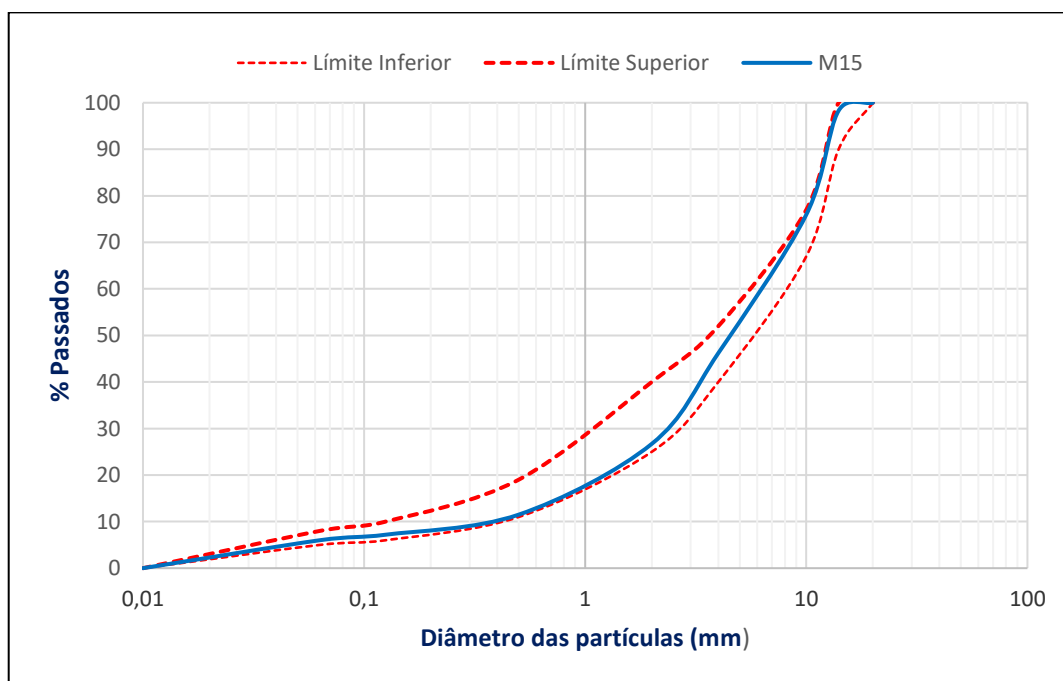


Figura 16 - Curva Granulométrica da mistura M15

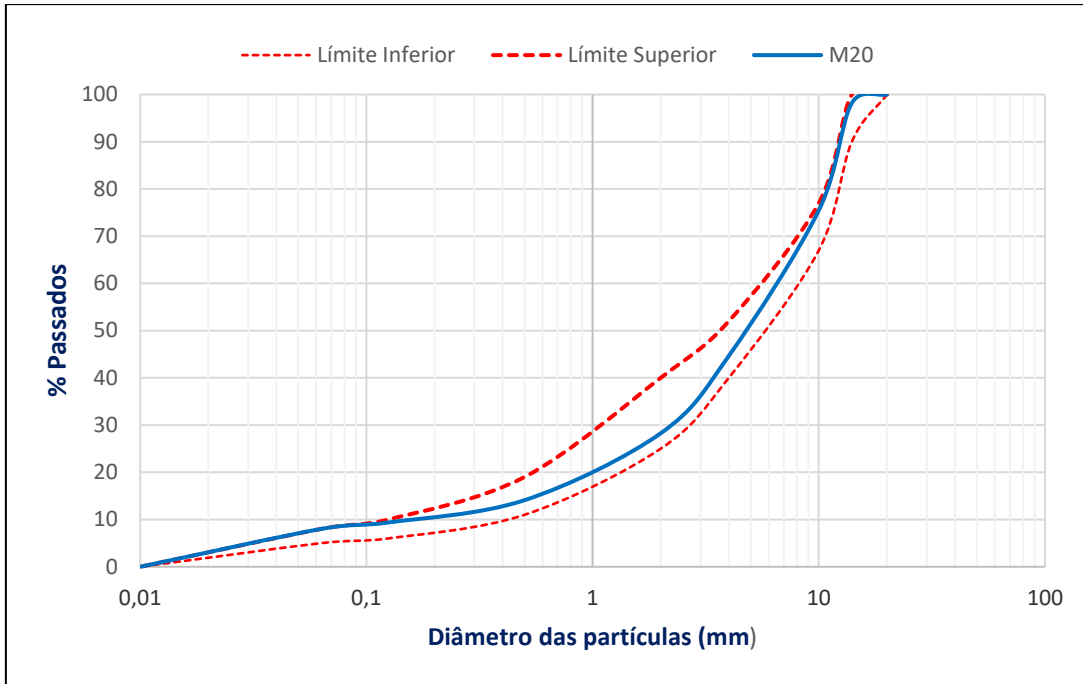


Figura 17 - Curva Granulométrica da mistura M20

Com base nas curvas granulométricas apresentadas anteriormente, evidencia-se que as misturas betuminosas estão em conformidade com o fuso granulométrico de uma AC14 surf (BB).

3.3.2. Estimativa do teor de betume inicial

A determinação da porcentagem de betume inicial (P_b) em relação ao peso total da mistura de agregados, considerando a sua superfície específica, foi realizada através da aplicação da expressão empírica 3.1:

$$P_b = 00,0355 \times A + 0,045 \times B + K \times C + F \quad (3.1)$$

Onde,

P_b - Porcentagem de betume em relação ao peso total da mistura;

A - Porcentagem de agregados retidos no peneiro de 2,36 mm;

B - Porcentagem de agregados que passa pelo peneiro de 2,36 mm e fica retida no peneiro de 0,075 mm;

C - Porcentagem de agregados que passa pelo peneiro de 0,075 mm;

K - Constante, função da quantidade de material que passa pelo peneiro de 0,075 mm, com valores específicos:

K - 0,15 para uma faixa de 11 a 15% que passa pelo peneiro de 0,075 mm;

K - 0,18 para uma faixa de 6 a 10% que passa pelo peneiro de 0,075 mm;

K - 0,20 para uma faixa $\leq 5\%$ que passa pelo peneiro de 0,075 mm.

F - Fator de absorção dos agregados, com um intervalo de 0 a 2%. Na falta de informação, assume-se $F = 0,7$.

Dado que a percentagem de material na mistura que passa pelo peneiro de 0,075 mm nas misturas de referência, M15 e M20, está no intervalo de 6 a 10%, selecionamos um coeficiente K de 0,018 para sua aplicação.

No caso das misturas M15 e M20, com incorporação de MBR, é necessário fazer uma correção ao valor da percentagem de ligante (P_b), uma vez que este material tem betume envelhecido, considerando que a taxa de reciclagem é de 15% e 20%, respetivamente. A percentagem de ligante novo para cada mistura, calcula-se através da equação 3.2.

$$Pb_N = Pb - \frac{Pb_{MBR} \times TR}{100} \quad (3.2)$$

Onde,

Pb_N - Percentagem de betume novo a ser utilizado na mistura;

P_b - Percentagem de ligante betuminoso em relação ao peso total da mistura;

Pb_{MBR} - Conteúdo de ligante betuminoso da mistura betuminosa recuperada;

TR - Taxa de reciclagem utilizada.

Na Tabela 13 é apresentada a percentagem final de betume novo que será utilizada nas várias misturas betuminosas.

Tabela 13 - Quantidade de betume novo a usar nas misturas betuminosas

Mezcla	Pb [%]	Pb _N [%]
MR	5,2	-
M15	5,3	4,4
M20	5,6	4,4

3.4. Determinação do teor ótimo de betume

De modo a selecionar o conteúdo ótimo de ligante, das misturas betuminosas com incorporação de MBR foram produzidos vários provetes. No caso da mistura betuminosa de referência (MR), foi utilizada uma formulação comumente empregue para misturas tradicionais fornecida pela empresa Diamantino Jorge & Filhos tendo sido produzidos quatro provetes de aproximadamente 1200 g cada com 5,2% de betume 35/50, apresentados na Figura 18.



Figura 18 - Provetes da mistura betuminosa MR

Em relação à mistura betuminosa M15, foram produzidos doze provetes de aproximadamente 1200 g cada com 4,4%, 3,9% e 3,4% de betume 35/50. Os provetes M15 foram denominadas com a letra A e apresentam-se na Figura 19. Em relação à mistura betuminosa M20, foram produzidos doze provetes de aproximadamente 1200 g cada um, com 4,9%, 4,4% e 3,9% de betume 35/50. Os provetes M20 foram denominadas com a letra B e apresentam-se na Figura 20.



Figura 19 - Provetes da mistura betuminosa M15



Figura 20 - Provetes de misturas betuminosas M20

3.4.1. Produção e compactação das misturas betuminosas

Na preparação dos provetes foi seguido o protocolo estabelecido pela norma EN 21697 – 35:2004. Para garantir condições ótimas, os agregados, a cal hidráulica e a MBR foram previamente secos a uma temperatura de $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$ numa estufa com ventilação por um período mínimo de 24 horas. A precisão para pesar cada um dos materiais, incluindo o peso do betume deve ser de 0,1%.

Conforme a norma EN 21697 – 35:2004, a temperatura de mistura para um betume 35/50 deve ser de 165°C. A empresa CEPSA, produtora do betume utilizado nas misturas, recomenda que a temperatura de mistura deve estar entre 162°C e 166°C. Antes de iniciar as misturas, é necessário pré-aquecer os moldes. Uma vez preparados e pesados todos os materiais procede-se à sua mistura manualmente até alcançar um aspeto uniforme e todos os agregados apresentarem um adequado revestimento pelo betume, como se apresenta na Figura 21.

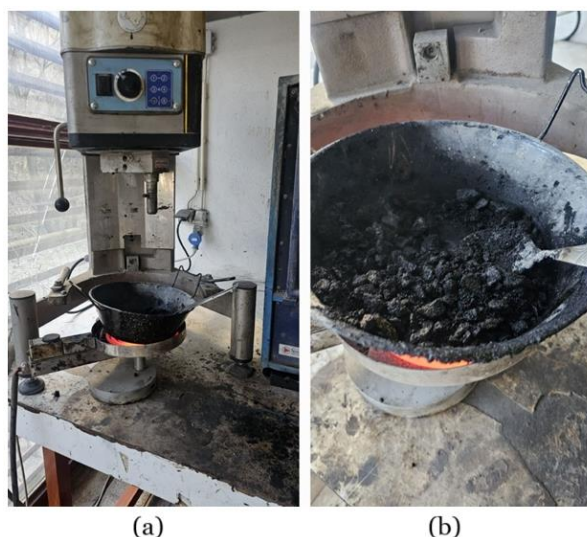


Figura 21 - (a) Aquecimento dos materiais, (b) Mistura pronta para compactação

Posteriormente, procedeu-se à compactação das misturas de acordo com o estabelecido na norma EN 12697 – 30. A mistura é colocada no molde, previamente untado com óleo e colocado um filtro de papel na base. De seguida faz-se uma compactação ligeira de modo a obter uma distribuição uniforme da mistura no molde, como se apresenta na Figura 22.

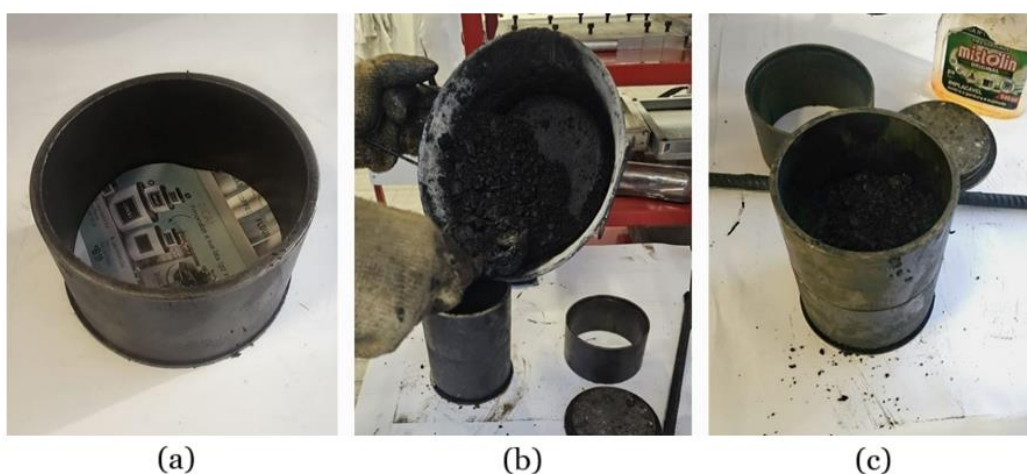


Figura 22 - (a) Filtro de papel para a base, (b) colocação da mistura no molde, (c) Molde com a mistura

Seguindo as recomendações da ficha técnica do betume 35/50 fornecida pela empresa CEPSA, a temperatura de compactação deve situar-se entre 152°C e 156°C. Uma vez

colocada a mistura no molde é compactada no compactador de impacto apresentado na Figura 23. Durante este processo, serão aplicadas 75 pancadas em cada face do provete.



Figura 23 – Compactador de impacto

Após um período de 4 horas, os provetes foram desmoldados como apresentado na Figura 24.

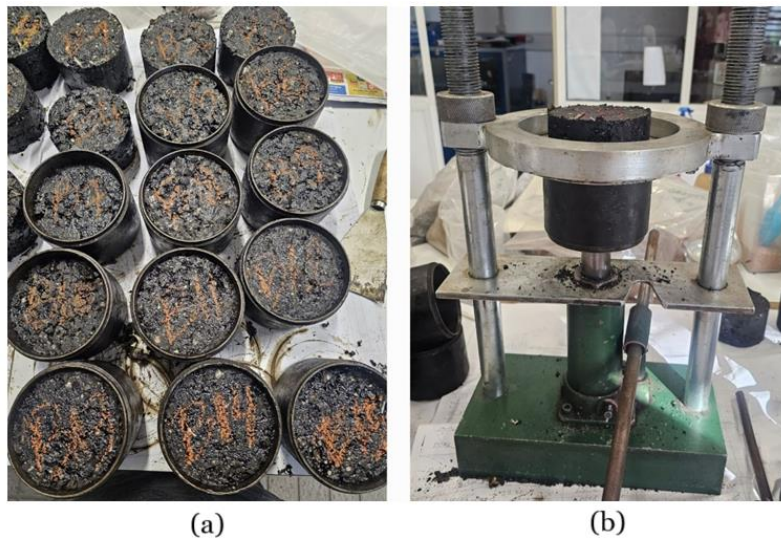


Figura 24 - (a) Período de arrefecimento de 4 horas, (b) desmolde dos provetes

3.4.2. Baridade máxima teórica

A determinação da baridade máxima teórica das misturas betuminosas produzidas realizou-se de acordo com a norma EN 12697 – 5:2002, Procedimento C. Este cálculo é feito com base na massa volúmica e na percentagem dos agregados e do betume utilizados nas misturas MR, M15 e M20, usando a expressão 3.3. Os resultados obtidos apresentam-se na Tabela 14.

$$\rho_{Max} = \frac{100}{\frac{p_b}{\rho_b} + \sum_{i=1}^N \frac{p_i}{\rho_i}} \quad (3.3)$$

Onde,

ρ_{Max} - Baridade Máxima Teórica [kg/m³];

P_b - Percentagem de betume [%];

ρ_b - Massa volúmica do betume [kg/m³];

P_i - Percentagem do agregado em função do peso total da mistura i [%];

ρ_i - Massa volúmica do agregado i [kg/m³]

Tabela 14 - Baridade Máxima Teórica das misturas betuminosas produzidas

Tipo de Mistura	Betume [%]	Baridade máxima teórica [kg/m³]
MR	5,2	2466
	3,4	2612
M15	3,9	2592
	4,4	2572
M20	3,9	2579
	4,4	2558
	4,9	2539

3.4.3. Baridade

A determinação da baridade dos provetes compactados é realizada seguindo as diretrizes estabelecidas na norma EN 12697 – 6:2003, pelo procedimento B. Este processo é realizado obtendo os valores dos pesos dos provetes em três condições: secos, saturados com a superfície seca e submersos em água, como ilustrado na Figura 25.

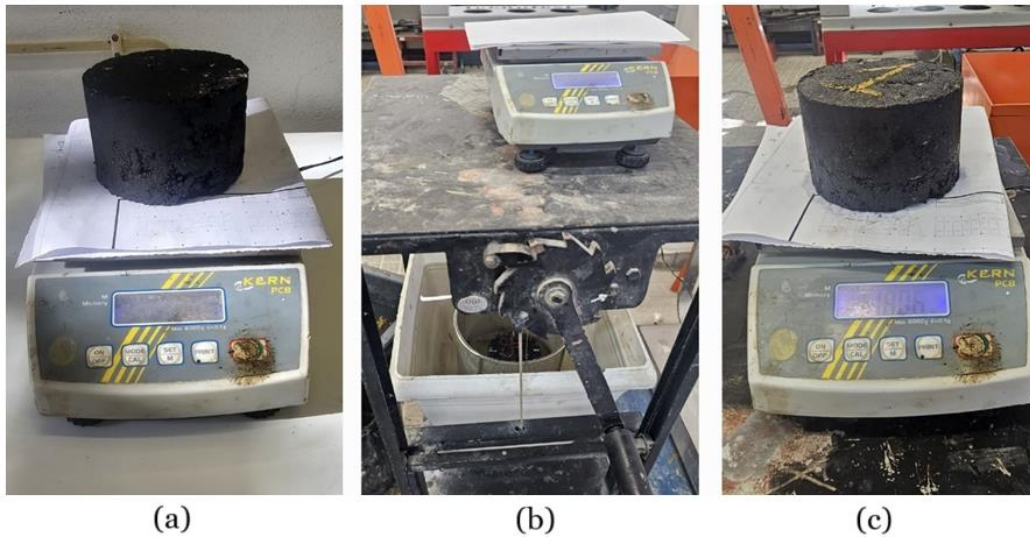


Figura 25 - Peso de cada provete em condições (a) seco, (b) submerso em água e (c) saturado com superfície seca.

Segundo a norma, a temperatura da água durante a imersão dos provetes deve ser registada, influenciando o valor da massa volúmica da mesma.

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w \quad (3.4)$$

Onde,

ρ_{bssd} - Baridade do provete saturado com superfície seca [kg/m³];

m_1 - Massa do provete seco [kg];

m_2 - Massa do provete saturado imerso [kg];

m_3 - Massa do provete saturado com a superfície seca [kg];

ρ_w - Massa volúmica da água à temperatura de ensaio [kg/m³].

Na Tabela 15 apresentam-se os resultados obtidos para a baridade das misturas MR, M15 e M20.

Tabela 15 - Baridade das misturas MR, M15 e M20 (Média 4 valores)

Tipo de Mistura	Betume [%]	Baridade [kg/m³]
MR	5,2	2340
	4,4	2448
M15	3,9	2430
	3,4	2393
M20	4,4	2464
	3,9	2450
	4,9	2475

É importante destacar que nenhum dos valores registados excede os valores de baridade máxima teórica, o que demonstra que o processo de construção dos provetes foi correto. Por outro lado, os valores mais elevados de baridade correspondem às percentagens mais elevadas de betume indicando que para estas os provetes obtidos apresentam melhor compactação e, conseqüentemente, uma menor porosidade.

3.4.4. Porosidade

O cálculo da porosidade é realizado de acordo com a norma EN 12697-8. Esta propriedade define a quantidade de espaços vazios dentro da mistura betuminosa, sendo esta análise de suma importância para a avaliação do comportamento das misturas betuminosas na presença de água.

De acordo com o Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas da Portugal, S.A. (EP, 2014) a porosidade da mistura betuminosa AC14 Surf (BB) deve situar-se entre 3% e 5%. A porosidade da mistura determina-se de acordo com a expressão 3.5. O resultado encontra-se apresentado na Tabela 16.

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \times 100 \quad (3.5)$$

Onde,

V_m - Porosidade da mistura [%];

ρ_m - Densidade máxima teórica da mistura [kg/m³];

ρ_b - Baridade da mistura [kg/m³].

Tabela 16 - Porosidade das misturas MR, M15 e M20 (média 4 valores)

Tipo de Mistura	Betume [%]	Porosidade [%]
MR	5,2	5,1
M15	4,4	4,8
	3,9	6,3
	3,4	8,4
	4,4	3,7
M20	3,9	5,0
	4,9	2,5

Na MR a porosidade média registada foi de 5,1%. Por outro lado, as misturas betuminosas M15 e M20 com um teor betume de 4,4%, apresentam uma melhor porosidade tendo valores de 4,8% e 3,7%, respetivamente, cumprindo o intervalo definido no Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas da Portugal, S.A. (EP, 2014) entre 3% e 5%.

3.4.5. Vazios na Mistura de Agregados

O cálculo dos Vazios na Mistura de Agregados é realizado de acordo com a norma EN 12697-8, a partir da expressão 3.6.

$$V_{MA} = V_m + B \times \frac{\rho_b}{\rho_B} \quad (3.6)$$

Onde,

V_{MA} = Percentagem de vazios na mistura de agregados [%];

V_m = Porosidade da mistura [%];

B = Percentagem de betume [%];

ρ_b = Baridade da mistura [kg/m³];

ρ_B = Massa volúmica do betume [kg/m³].

Os resultados obtidos apresentam-se na Tabela 17.

Tabela 17 - Vazios na Mistura de Agregados das misturas MR, M15 e M20 (Média 4 valores)

Tipo de Mistura	Betume [%]	VMA [%]
MR	5,2	16,9
M15	4,4	15,3
	3,9	16,6
	3,4	18,6
M20	4,4	14,2
	3,9	15,5
	4,9	13,1

De acordo com o Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas da Portugal, S.A. (EP, 2014) os vazios na mistura dos agregados para as misturas betuminosas de camadas de desgaste AC 14 Surf (BB) devem apresentar um valor mínimo de 14%. Os provetes de referência apresentam um valor médio de VMA de 16,9%. As misturas M15 e M20 atendem ao requisito, exceto a mistura M20 com 4,9% de betume que apresenta um VMA de 13,1%.

3.4.6. Vazios preenchidos com betume

O cálculo dos Vazios preenchidos com betume, é realizado de acordo com a norma EN 12697-8, a partir da expressão 3.7.

$$VFB = \frac{B \times \frac{\rho_b}{\rho_B}}{VMA} \times 100 \quad (3.7)$$

Onde,

VFB - Percentagem de vazios preenchidos com betume [%];

VMA - Percentagem de vazios na mistura de agregados [%];

B - Percentagem de betume [%];

ρ_b - Baridade da mistura [kg/m³];

ρ_B - Massa volúmica do betume [kg/m³].

Os resultados para o VFB apresentam-se na Tabela 18.

Tabela 18 - Vazios preenchidos com betume nas misturas MR, M15 e M20 (Média 4 valores)

Tipo de Mistura	Betume [%]	VFB [%]
MR	5,2	69,7
	4,4	68,6
M15	3,9	62,4
	3,4	55,0
M20	4,4	74,1
	3,9	67,8
	4,9	80,7

Os resultados obtidos para o VFB da mistura de referência, apresenta um valor de 69,7%, para as misturas M15 o resultado variou entre 55% e 68,6%; enquanto para as misturas M20 o resultado variou entre 67,8% e 80,7%. É importante destacar que a mistura M20, com 4,9% de betume, apresentou um VFB de 80,7%, excedendo todos os valores das outras misturas.

3.4.7. Ensaio Marshall

O ensaio Marshall foi realizado seguindo as especificações da norma EN 12697-34:2004. O objetivo principal deste procedimento é submeter os provetes a uma carga progressiva até que o material atinja seu ponto de rotura, determinando a Estabilidade e a Deformação máxima.

A norma define o acondicionamento prévio ao ensaio de carga dos provetes, devendo ser imersos num banho de água a uma profundidade de pelo menos 150 mm, a uma temperatura de 60 ± 1 °C por um período de 40 a 60 minutos, equipamento apresentado na Figura 26. Os provetes devem ser submetidos a uma taxa de carga constante de 50 ± 2 mm/min até atingir o ponto de rotura.

O Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal, S.A. (EP, 2014) define que, para a mistura AC14 Surf (BB), a estabilidade deve estar entre 7,5 e 15 kN, enquanto a deformação deve variar entre 2 e 4 mm.

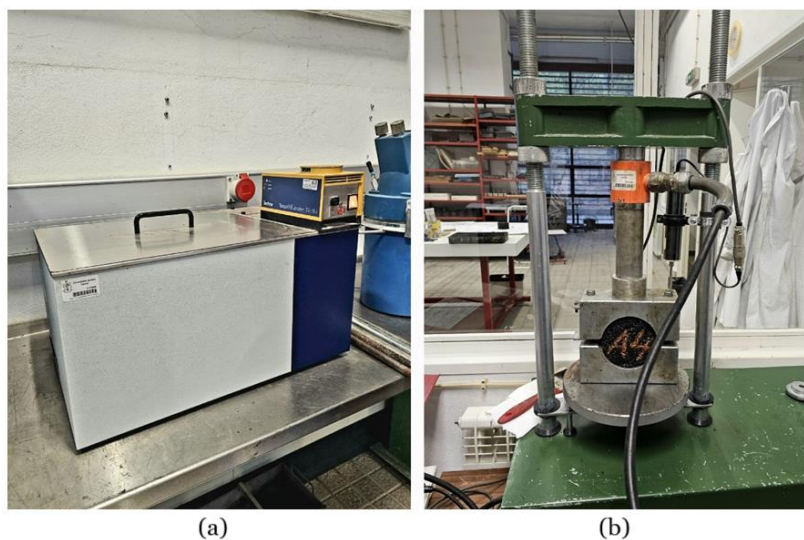


Figura 26 – (a) Banho dos provetes, (b) Máquina de compressão Marshall.

Os resultados obtidos através do Ensaio Marshall para a Estabilidade e Deformação apresentam-se na Tabela 19.

Tabela 19 - Estabilidade e deformação das misturas MR, M15 e M20 (Média 4 valores)

Tipo de Mistura	Betume [%]	Estabilidade [kN]	Deformação [mm]
MR	5,2	17,1	3,1
M15	4,4	13,7	4,3
	3,9	14,1	3,0
	3,4	12,1	2,9
M20	4,4	12,6	2,7
	3,9	13,1	3,3
	4,9	11,7	3,7

Nas Figuras 27 e 28 apresentam-se os resultados médios para a estabilidade e deformação das misturas M15 e M20.

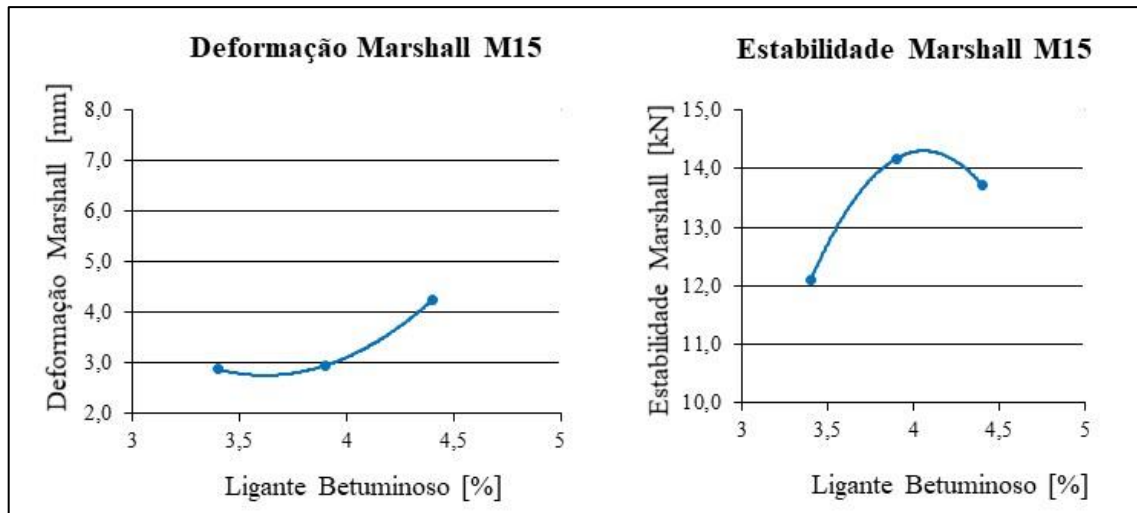


Figura 27 - Curvas de deformação e estabilidade Marshall das misturas betuminosas M15.

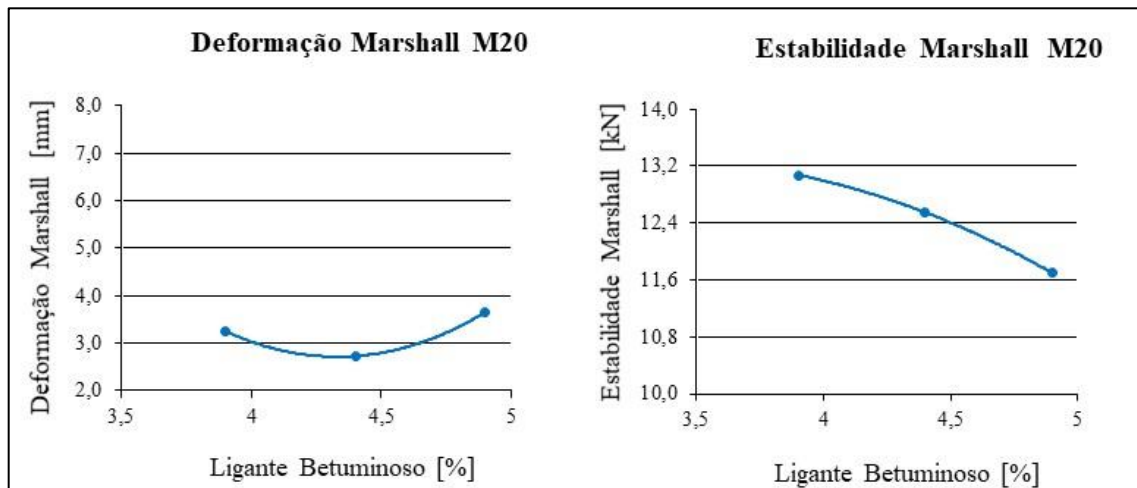


Figura 28- Curvas de deformação e estabilidade Marshall das misturas betuminosas M20.

Embora o valor médio de Estabilidade para MR exceda ligeiramente o intervalo para a mistura AC14 Surf (BB) definido no Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas da Portugal, S.A. (EP, 2014) registando um valor de 17,1 kN, os valores de estabilidade para as misturas M15 e M20 estão dentro dos requisitos estabelecidos.

Quanto à deformação, a maioria das misturas cumpre os critérios estabelecidos. No entanto, a mistura M15, com 4,4% de betume excede ligeiramente o limite superior do intervalo, apresentando um valor de deformação de 4,3 mm. É importante concluir que, apesar das variações encontradas, as misturas M15 e M20 atendem aos parâmetros aceitáveis em termos de estabilidade e deformação para sua aplicação em pavimentação, conforme as especificações de Portugal.

3.4.8. Seleção da mistura betuminosa mais adequada

Com base no Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal, S.A. (EP, 2014) existem várias especificações que devem ser cumpridas para misturas a aplicar em camadas de desgaste do tipo AC 14 Surf (BB). A mistura que melhor se adequar aos intervalos estabelecidos será escolhida como mistura de projeto. Essas especificações são apresentadas na Tabela 20:

Tabela 20 - Requisitos para AC 14 Surf BB (EP, 2014)

Requisitos / Parâmetros	Referência normativa	AC 14 Surf BB
Estabilidade Marshall [kN]	EN 12697 – 34	7,5 – 15
Deformação Marshall [mm]	EN 12697 – 34	2 – 4
Percentagem de vazios na mistura de agregados VMA [%]	EN 12697 – 8	Min 14
Porosidade [%]	EN 12697 – 8	3 – 5
Quociente Marshall [kN/mm]	EN 12697 – 34	3

Na Tabela 21 apresenta-se um resumo dos resultados obtidos nos ensaios das misturas betuminosas MR, M15 e M20.

Tabela 21 - Resultados obtidos nos ensaios das misturas betuminosas MR, M15 e M20.

Tipo de Mistura	Percentagem de ligante [%]	Estabilidade Marshall [kN]	Deformação Marshall [mm]	VMA [%]	Porosidade [%]	Quociente Marshall [kN/mm]
MR	5,2	17,1	3,1	16,9	5,1	5,6
	4,4	13,7	4,3	15,3	4,8	3,2
M15	3,9	14,2	3,0	16,6	6,4	4,8
	3,4	12,1	2,9	18,6	8,4	4,2
M20	4,4	12,6	2,7	14,2	3,7	4,6
	3,9	13,1	3,3	15,5	5,0	4,0
	4,9	11,7	3,7	13,1	2,5	3,2

As misturas de referência foram produzidas para estabelecer uma base comparativa que permita avaliar o desempenho das misturas betuminosas com incorporação de resíduos da Mina da Panasqueira e MBR. Neste contexto, observa-se que a estabilidade Marshall da mistura MR apresenta um valor de 17,10 kN, excedendo o limite superior estabelecido pela norma portuguesa. Da mesma forma, foram obtidos os valores de estabilidade Marshall das misturas M15 e M20, apresentando valores que cumprem os requisitos da norma. Ao comparar os valores de estabilidade da mistura MR com as misturas M15 e M20, verifica-se que a incorporação de MBR melhora a estabilidade para todas as percentagens de betume.

Para fazer a avaliação do desempenho das misturas à sensibilidade à água e à resistência às deformações permanentes, optou-se por selecionar o conteúdo ótimo de ligante para as misturas M15 e M20. Assim, para a mistura M15, foi escolhido 4,4% de betume, que embora ligeiramente fora do intervalo em termos de deformação, apresenta menor porosidade e excelente estabilidade, atendendo aos requisitos necessários. No caso da mistura M20, também foi escolhida uma proporção de ligante betuminoso de 4,4%, que satisfaz não apenas os requisitos de estabilidade e deformação, mas também mostrou os melhores resultados no estudo de porosidade e deformação Marshall.

3.5. Sensibilidade à água

O ensaio de sensibilidade à água realizou-se de acordo com a norma EN 12687-12. A realização deste ensaio é fundamental para avaliar como a saturação e o condicionamento acelerado em água afetam a resistência à tração indireta das misturas betuminosas, ajudando a compreender e antecipar as consequências da exposição à água dessas misturas, garantindo assim a sua durabilidade e desempenho.

Assim, para a avaliação da sensibilidade à água produziram-se um total de 30 provetes apresentadas na Figura 29: 10 provetes MR com 5,2% de betume, 10 provetes M15 com 4,4% de betume e 10 provetes M20 com 4,4% de betume.

Antes de iniciar os ensaios, é imperativo realizar a medição das dimensões dos provetes de acordo com o estabelecido pela norma EN 12697-29. Esta norma detalha o procedimento para obter as dimensões e o volume de cada provete.

De acordo com a norma EN 12687-12, os provetes devem ser divididos em dois grupos com baridade semelhante. Um será mantido a seco a uma temperatura ambiente de $20^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$, enquanto o outro será submerso num banho de água a $40^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ por 68 a 72 horas. Na Tabela 22 apresentam-se os resultados da Baridade e Porosidade dos provetes das diferentes misturas.



Figura 29 - Provetes cilíndricos para o ensaio de sensibilidade à água das misturas (a) MR, (b) M15 e (c) M20.

Tabela 22 - Baridade e porosidade das amostras secas e imersas das misturas MR, M15 e M20.

Tipo de Mistura	Betume [%]	Provete	Baridade [kg/m ³]		Porosidade [%]	
			Seco	Imerso	Seco	Imerso
MR	5,2	1	2382		3,4	
		2		2307		6,5
		3		2327		5,6
		4		2320		5,9
		5	2328		5,6	
		6	2333		5,4	
		7	2323		5,8	
		8		2325		5,7
		9		2328		5,6
		10	2325		5,7	
M15	4,4	A1		2472		3,9
		A2		2447		4,9
		A3	2470		4,0	
		A4	2449		4,8	
		A5		2429		5,5
		A6	2460		5,1	
		A7	2457		5,2	
		A8	2460		5,1	
		A9		2414		6,1
		A10		2420		5,9

		B1	2477	3,2
		B2	2475	3,3
		B3	2440	4,6
		B4	2457	4,0
		B5	2456	4,0
		B6	2455	4,0
		B7	2477	4,0
		B8	2458	3,9
		B9	2465	4,4
		B10	2475	4,0
M20	4,4			

O grupo de provetes imerso deverá ser previamente submetido a vácuo, como apresentado na Figura 30, a uma temperatura de $20^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{C}$ por 30 ± 5 minutos, a uma pressão absoluta de $6,7 \pm 0,3$ kPa, para permitir que a água penetre de forma eficaz nos vazios dos provetes.



Figura 30 - Grupo imerso em recipiente de vácuo.

Em seguida, determinou-se novamente o volume dos provetes de modo a aferir se houve alteração do seu volume inicial, devendo ser descartados todos os provetes que tenham aumentado mais de 2% do seu volume inicial. Neste estudo experimental nenhum provete foi descartado.

De seguida, os mesmos provetes imergiram-se num banho de água a uma temperatura controlada de $40^{\circ} \text{C} \pm 1^{\circ} \text{C}$ por um período de 68 a 72 horas. Após o banho a 40°C , os provetes são retirados e colocados novamente imersos a uma temperatura de 15°C durante 2 horas. Por outro lado, o grupo que permaneceu em condições secas será mantido à temperatura ambiente de 15°C pelo mesmo período.

Posteriormente, conforme a norma EN 12697-23:2003, será realizado o ensaio para determinar a resistência à tração indireta por compressão diametral a uma temperatura de 15°C. e com uma velocidade constante de 50 ± 1 mm/min, até rotura dos provetes.

A norma EN 12697-23:2003 classifica diferentes tipos de rotura em três categorias:

- Rotura Clara: O provete sofre uma rotura ao longo de uma linha diametral, com exceção de pequenas secções triangulares próximas à zona de contato.
- Deformação: O provete não apresenta uma linha de rotura claramente visível.
- Combinação: proveta provete apresenta uma rotura clara ao longo da linha diametral e também exhibe deformações próximas à zona de contato.

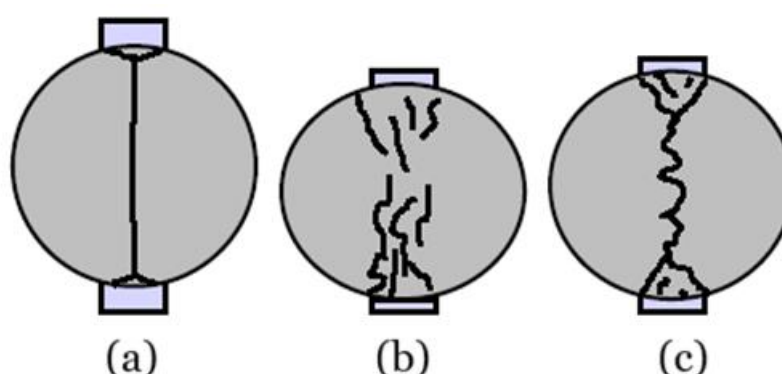


Figura 31 - Roturas por tração indireta através de compressão diametral: (a) Rotura clara, (b) deformação, (c) combinação (EN 12697 – 23: 2003)

Para ambos os grupos seco e submerso, a norma EN 12697 – 23: 2003 propõe a determinação da resistência à tração indireta através da expressão 3.8.

$$ITS = \frac{2 P}{\pi D H} \quad (3.8)$$

Onde,

ITS - Resistência à tração indireta [kPa];

P - Carga Máxima [kN];

D - Diâmetro médio do provete [mm];

H - Altura média do provete [mm].

A norma EN 12697-12 correlaciona a resistência à tração indireta dos provetes secos com os provetes imersos através da expressão 3.9.

$$ITSR = 100 \times \frac{ITS_w}{ITS_d} \quad (3.9)$$

Onde,

ITSR - Resistência conservada de tração indireta [%];

ITS_w - Média da resistência à tração indireta do grupo imerso [kPa];

ITS_d - Média da resistência à tração indireta do grupo seco [kPa].

Na Figura 32 apresentam-se os provetes secos e imersos após ensaiados que, de acordo com a norma, exibem uma rotura do tipo C.



Figura 32 - Provetes ensaiados com falha tipo C

Na Tabela 23 apresentam-se os valores médios obtidos para a resistência à tração indireta dos grupos de provetes secos e imersos para as diferentes misturas MR, M15 e M20.

Tabela 23 - Resistência à tração indireta (média 5 valores) e resistência conservada da tração indireta [%]

Tipo de Mistura	ITS [kPa]		ITSR [%]
	Seco	Imerso	
MR	2246	1184	53
M15	2549	1437	56
M20	2486	1558	63

Observa-se que as misturas que contêm 15% e 20% de MBR apresentam valores superiores aos da mistura de referência, o que indica que o uso desse material melhora a estabilidade

da mistura em comparação com a mistura de referência com utilização de agregados tradicionais. Em condições secas, o ITS utilizando 15% de MBR melhorou a resistência em 11,9%, enquanto com 20% de MBR melhorou 9,7% em comparação com a mistura de referência. Por outro lado, em condições húmidas, a resistência à tração indireta melhorou em 17,6% e 24,0% ao utilizar 15% e 20% de MBR, respetivamente.

No ensaio de sensibilidade à água, embora tenha sido melhorada a resistência à tração utilizando uma mistura betuminosa recuperada, recomenda-se utilizar produtos aditivos que impermeabilizem o material de modo a aumentar essa resistência. É importante destacar que os materiais porosos têm uma maior suscetibilidade à água. Este fenómeno ocorre porque os materiais porosos têm uma maior capacidade de absorver líquidos, tornando-os propensos a sofrer alterações físicas e químicas devido à água.

3.6. Ensaio de módulo de rigidez por tração indireta

O ensaio do módulo de rigidez por tração indireta foi realizado de acordo com a norma EN 12697-26:2004, Anexo C, conforme apresentado na Figura 33. Foram ensaiados cinco provetes de cada mistura betuminosa, MR, M15 e M20 com o teor ótimo de betume, ao longo de duas direções diametralmente opostas.

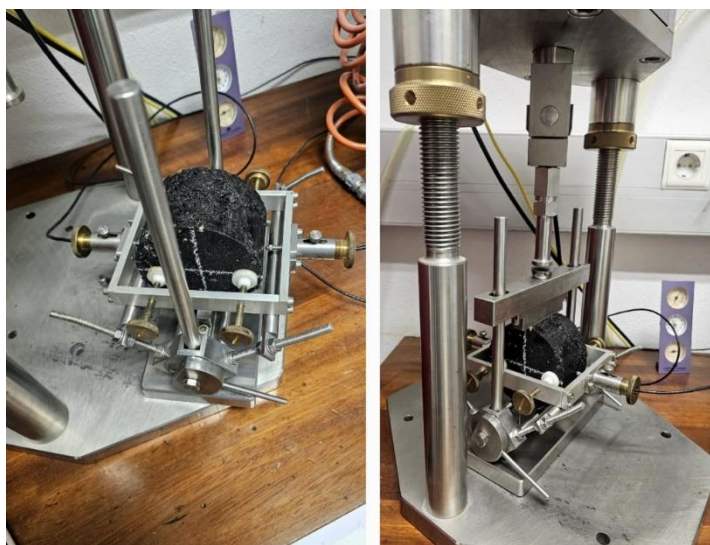


Figura 33 - Ensaio de módulo de rigidez por tração indireta.

A norma estabelece vários parâmetros que devem ser cumpridos, tais como a temperatura de ensaio de 20°C, o coeficiente de Poisson de 0,35, um tempo de crescimento de carga de 124 milissegundos, uma deformação horizontal máxima de 5 μm . O módulo de rigidez é determinado com base na aplicação de 5 cargas repetidas, antecedidas de um pré-carregamento que tem como objetivo o ajuste do sistema de carga ao tipo de mistura do provete. Em relação às dimensões dos provetes, foi seguido o procedimento estabelecido na norma EN 12697-29, que determina o processo para obter a altura e o diâmetro médios. Na

Tabela 24 apresentam-se os resultados obtidos para a baridade, porosidade e módulo de rigidez.

Tabela 24 - Baridade, porosidade e Módulo de Rigidez das misturas MR, M15 e M20 (média 5 valores).

Tipo de Mistura	Betume [%]	Baridade [kg/m³]	Porosidade [%]	Módulo de Rigidez [MPa]
MR	5,2	2338	5,2	7195
M15	4,4	2459	4,8	11343
M20	4,4	2474	3,8	11739

Com base nos valores obtidos para o Módulo de rigidez para as misturas betuminosas MR, M15 e M20, pode-se concluir que quanto maior o valor da rigidez, menos flexível mais resistente será a mistura a deformações permanentes. Portanto, dado que a rigidez da mistura betuminosa MR é menor do que as misturas M15 e M20, a mistura MR é mais flexível e menos resistente a deformações permanentes sob cargas, em comparação com as misturas betuminosas M15 e M20.

Isso é benéfico para certas estradas, por exemplo, aquelas com alto tráfego ou em locais onde é necessária uma maior resistência à deformação e menor propensão a formação de fissuras. No entanto, uma mistura muito rígida pode tornar-se quebradiça ao longo do tempo, o que pode resultar em fissuras devido à fadiga. É importante encontrar um equilíbrio na rigidez para obter uma resistência ótima à deformação permanente e fadiga, minimizando danos prematuros.

Infelizmente, não existem resultados que sugiram uma rigidez ideal, devido a diversos fatores como clima, temperatura, local da pavimentação da estrada, método de mistura, tipo de material reciclado utilizado, tráfego e cargas, tipo de solo subjacente, topografia e traçado da estrada, qualidade dos materiais, orçamento e disponibilidade de recursos, além de normas e especificações locais. São necessários mais ensaios e estudos para determinar correlações gerais entre os diferentes métodos de ensaio e estabelecer critérios mais claros para a avaliação da rigidez (Belhaj & Valentin, 2023).

3.7. Resistência à deformação permanente

A norma EN 12697-22: 2003 descreve o procedimento de ensaio destinado a avaliar a tendência de uma mistura betuminosa sofrer deformações sob cargas. Este ensaio de simulação de tráfego aplica-se não só a provetes fabricados em laboratório, mas também a provetes obtidos diretamente de pavimentos aplicados, cortando secções do pavimento,

para inspeção e avaliação ou desenvolvimento de propostas de manutenção. A propensão das misturas betuminosas à deformação é avaliada pelo sulco deixado pela roda de carga após passar múltiplas vezes sobre a sua superfície.

Os provetes para a realização deste ensaio, apresentados na Figura 34 e 35 são prismáticos, ou seja, lajetas com 30 cm de largura, 30 cm de comprimento e, espessura variável com o tamanho máximo do agregado utilizado no fabrico da mistura. De acordo com a norma EN 12697-22: 2003 para misturas cujo agregado tem um tamanho igual ou superior a 8 mm e inferior a 16 mm, a lajeta terá uma espessura nominal de 4 cm. Foram produzidas 2 lajetas para cada tipo de mistura, MR, M15 e M20.

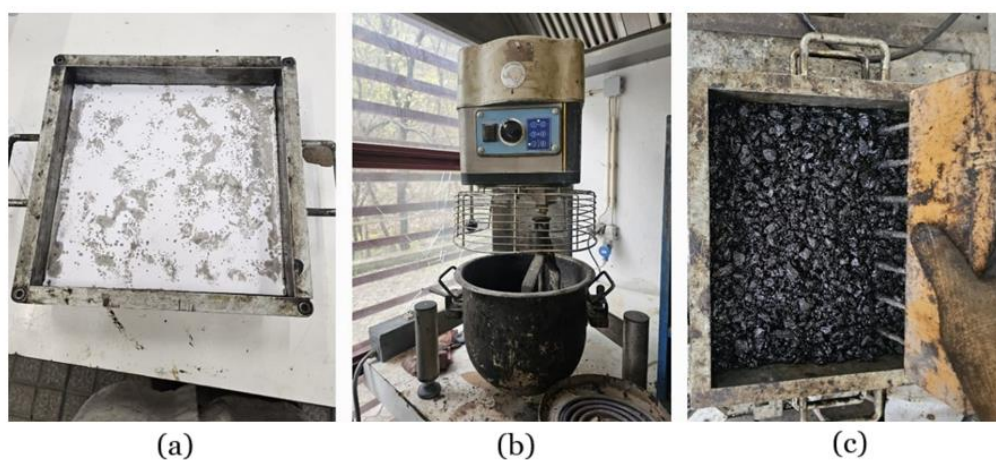


Figura 34 - Processo de produção das lajetas: (a) Molde para as lajetas, (b) Mistura do material betuminoso, (c) Colocação da mistura no molde.

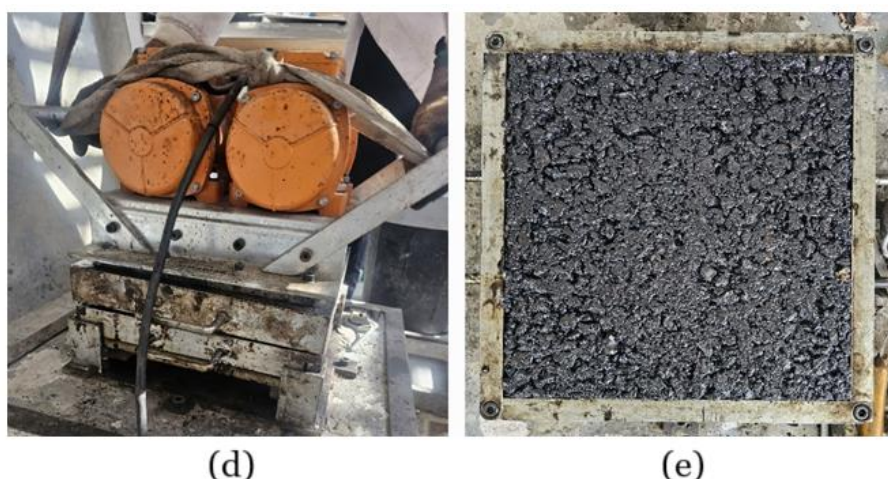


Figura 35 - (d) Compactação por vibração, (e) Lajeta compactada.

A baridade das lajetas determinou-se com base na norma EN 12697-6:2003, Procedimento D. Na Tabela 25 apresentam-se os resultados obtidos para a Baridade e porosidade das lajetas das diferentes misturas MR, M15 e M20.

Tabela 25 - Baridade das lajetas das misturas MR, M15 e M20.

Tipo de Mistura	Betume [%]	Lajeta	Baridade [kg/m³]	Baridade Media [kg/m³]	Porosidade [%]	Porosidade Media [%]
MR	5,2	MR- 1	2245	2222	9,0	9,9
		MR - 2	2200		10,8	
M15	4,4	M15 - 1	2323	2298	9,7	10,6
		M15 - 2	2274		11,6	
M20	4,4	M20 - 1	2320	2301	9,3	10,0
		M20 - 2	2283		10,8	

Conforme observado na tabela anterior, as baridades médias das lajetas apresentam valores superiores aos calculados nos provetes cilíndricos. Na Tabela 26 comparam-se as baridades e porosidades médias dos provetes cilíndricos utilizados para o ensaio Marshall e destas lajetas.

Tabela 26 - Análise comparativa da baridade e porosidade das lajetas e provetes cilíndricos.

Tipo de Mistura	Betume [%]	Baridade Media [kg/m³]		Porosidade Media [%]	
		Lajetas	Cilíndricos	Lajetas	Cilíndricos
MR	5,2	2222	2340	9,9	5,1
M15	4,4	2298	2448	10,6	4,8
M20	4,4	2301	2464	10,0	3,7

Como se pode observar na tabela anterior, a baridade das lajetas é inferior à dos provetes cilíndricos, enquanto a porosidade é superior. Uma menor densidade resulta num aumento da porosidade e vice-versa. A porosidade aumentou devido ao processo de compactação na produção dos provetes cilíndricos e nas lajetas ser diferente. A compactação por impacto dos provetes cilíndricos é mais eficaz do que a compactação por vibração, método utilizado na compactação das lajetas.

Após o cálculo das baridades, as lajetas devem ser deixadas em repouso à temperatura ambiente por um período de 7 dias antes de iniciar o ensaio de deformação permanente. Após esse período, são colocadas no equipamento de simulação de tráfego.

A temperatura da lajeta e do equipamento deve ser de 60°C, sendo necessário realizar um aquecimento prévio de, no mínimo, 4 horas. A pressão da roda deve ser de 600 ± 30 kPa.

Antes de iniciar o ensaio, devem colocar-se, de acordo com o preconizado na norma EN 12697-22:2003, 4 pesos de 4,6 kg. O ensaio, apresentado na Figura 36, termina após a aplicação de 10.000 ciclos de carga ou até que as lajetas atinjam uma deformação com profundidade de 20 mm.

Através do ensaio de deformação permanente, foram obtidos dois dados importantes para cada lajeta. O primeiro é o declive máximo de rodeira (WTS, do inglês *Wheel Tracking Slope*) e a profundidade média de rodeira (R_D). Na Figura 37 apresentam-se as lajetas após realização do ensaio onde são visíveis as rodeiras formadas.



Figura 36 - Lajeta submetida ao ensaio de deformação permanente



Figura 37 - Deformação permanente nas lajetas MR, M15 e M20

Nas Figuras 38, 39 e 40 encontram-se representados os resultados dos ensaios de resistência à deformação permanente para as misturas MR, M15 e M20, respectivamente.

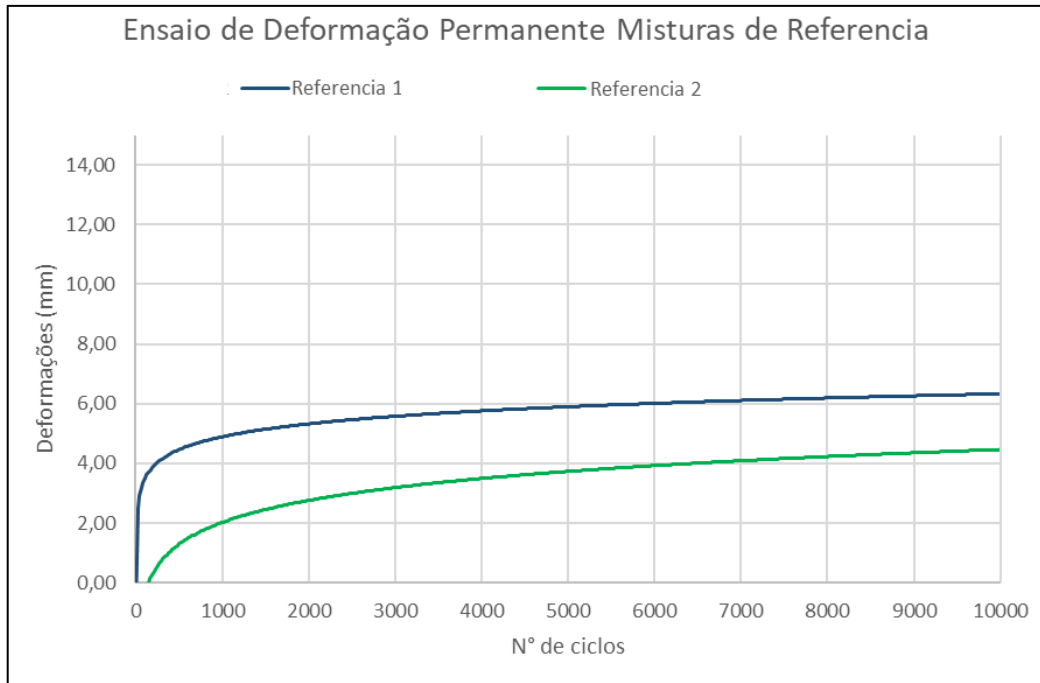


Figura 38 - Curva de tendência de deformação das lajetas MR

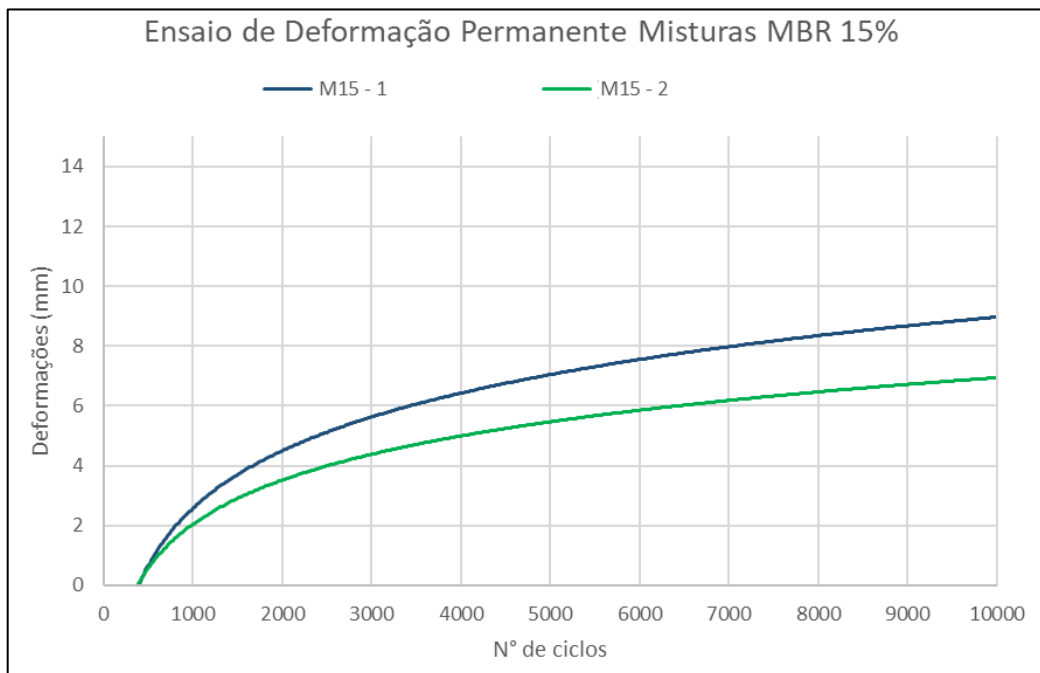


Figura 39 - Curva de tendência de deformação das lajetas M15

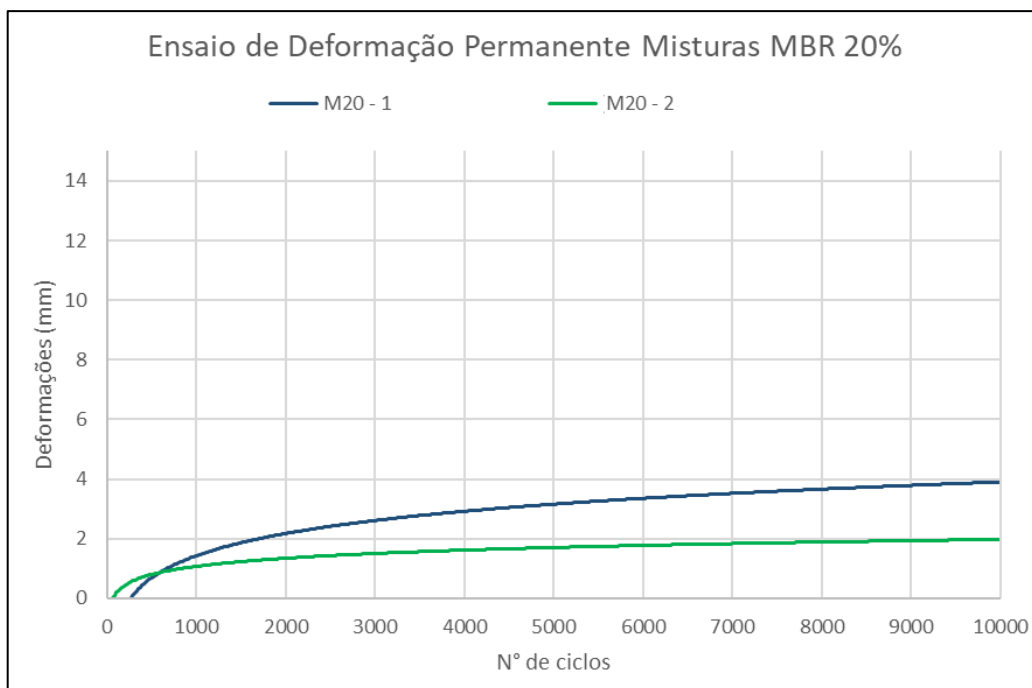


Figura 40 - Curva de tendência de deformação das lajetas M20.

A análise dos resultados revela que a mistura M15 exibe uma deformação significativamente maior em comparação com a mistura MR e a mistura M20. O valor médio de deformação para a mistura M15 é de 9,50 mm, enquanto para a mistura M20 é de 3,3 mm e para a mistura MR é 5,85 mm. Comparativamente à mistura MR e M15, a mistura M20 apresenta uma melhoria de 44% e 65%, respectivamente. Esta melhoria deve-se à maior percentagem de MBR o que leva a uma maior percentagem de betume envelhecido e, conseqüentemente, a uma menor penetração de betume resultante na mistura.

O declive máximo de rodeira, WTS, determina-se a partir da expressão 3.11.

$$WTS_{air} = \frac{d_{10000} - d_{5000}}{5} \quad (3.11)$$

Onde,

WTS_{air} - Declive máximo da rodeira [mm/10³ ciclos];

D_{10000} - Profundidade após 10.000 ciclos [mm];

D_{5000} - Profundidade após 5.000 ciclos [mm].

Na Tabela 27 apresentam-se os resultados de WTS e R_D para as diferentes misturas.

Tabela 27 - Declive máximo de rodeira (WTS) e profundidade média de rodeira (RD) das misturas.

Tipo de Mistura	Betume [%]	Lajeta	R_D [mm]	WTS_{air} [mm/10³ ciclos]	WTS_{air} médio [mm/10³ ciclos]
MR	5,2	MR 1	6,5	0,28	0,31
		MR 2	5,2	0,33	
M15	4,4	M15 – 1	10,8	0,91	0,80
		M15 – 2	8,5	0,68	
M20	4,4	M20 – 1	4,5	0,28	0,19
		M20 – 2	2,1	0,10	

O valor de WTS é um indicador da resistência à deformação permanente de uma mistura. Quanto maior este valor, maior será a tendência à deformação permanente sob a aplicação de cargas de tráfego. Por outro lado, valores menores indicam uma menor deformação. A deformação da mistura M20 com 4,4% tem uma resistência à deformação melhor comparada às misturas de referência e M15. Se compararmos os resultados de WTS da mistura M20 com a mistura MR, observa-se uma melhoria de 38,7%, enquanto comparada ao resultado da mistura M15, a mistura M20 apresenta uma melhoria de 76,3%.

Capítulo 4 – Conclusões e Recomendações para trabalhos futuros

O ramo da construção de infraestruturas viárias na Engenharia Civil hoje em dia tem como prioridade encontrar um sistema sustentável e alternativas economicamente viáveis para a construção, manutenção e reparação de estradas. Por este motivo, o uso de resíduos industriais surge como uma fonte valiosa para substituir agregados e materiais de origem natural não renovável, abrindo uma oportunidade para o seu uso na economia circular.

A incorporação de resíduos industriais na fabricação de misturas betuminosas a quente é uma prática que contribui para a sustentabilidade ambiental e a eficiência económica do setor da construção. Estes resíduos podem apresentar-se em diferentes formas, tais como, cinzas, pós, escórias, entre outros. O seu uso não só reduz a necessidade de utilizar materiais convencionais, como também ajuda a mitigar problemas ambientais associados à deposição de resíduos em aterros e à extração de recursos naturais não renováveis.

O uso de misturas betuminosas recuperadas (MBR) é uma prática que se concentra na reciclagem e reutilização de materiais retirados durante a manutenção ou reconstrução de estradas. Estes materiais incluem agregados, betume e aditivos que cumprem as normas de construção, mas que envelheceram e deterioraram-se com o tempo. A principal proposição desta prática é reduzir a necessidade de utilizar novos materiais, incluindo o betume, e reduzir estes resíduos incorporando-os em novas misturas betuminosas.

Para além das MBR, foi utilizado na produção das misturas betuminosas o resíduo da exploração mineira da Mina da Panasqueira. Localizada no concelho da Covilhã, numa região geológica com uma formação rochosa distinta, estes resíduos rochosos classificados como grauvaques, constituem um material de grande relevância para a Engenharia Civil, especialmente na construção de estradas. A incorporação destes resíduos mineiros nas misturas betuminosas desenvolvidas nesta dissertação, contribui para a gestão integral dos recursos minerais, demonstrando a capacidade de aproveitar de forma eficaz e sustentável os recursos naturais em diversos contextos.

Nesta dissertação foi realizado um estudo experimental com misturas betuminosas a quente produzidas com betume 35/50 para camada de desgaste determinando a formulação ótima, incorporando MBR e resíduos da Mina da Panasqueira (agregados grauvaques). Foram produzidas três misturas distintas: Uma mistura de referência (MR) para servir de comparação utilizando apenas agregados tradicionais graníticos e duas misturas

incorporando 15% e 20% de MBR, nomeadamente M15 e M20. Para a MR usou-se uma fórmula típica e usualmente utilizada para camada de desgaste do tipo AC14 surf (BB) fornecida pela empresa Diamantino Jorge & Filhos. Para a M15 e M20 foi feito o estudo de formulação obtendo a composição mais adequada de resíduo da Mina da Panasqueira e MBR assim como o teor ótimo de ligante, através do ensaio Marshall.

Os valores preconizados no Caderno de Encargos Tipo Obra das Estradas de Portugal, S.A., para uma mistura AC14 surf (BB) para a estabilidade e deformação Marshall são 7,5 a 15 kN e 2 a 4 mm, respetivamente. Quanto aos resultados do ensaio Marshall a mistura MR apresentou 17,1 kN de estabilidade, ligeiramente superior ao intervalo especificado. As misturas M15 e M20 atendem aos critérios exigidos tanto em estabilidade como em deformação para uso em pavimentação, embora a mistura M15 apresente um valor de deformação de 4,3 mm, ligeiramente superior ao valor máximo estabelecido. Em resumo, as misturas M15 e M20 são adequadas, demonstrando que se ajustam aos padrões requeridos e oferecem resultados satisfatórios em termos de qualidade e desempenho, podendo seleccionar-se a quantidade ótima de betume de 4,4% para as misturas M15 e M20.

Com base nos resultados obtidos para o ensaio de sensibilidade à água, as misturas com incorporação de 15% e 20% de MBR mostraram melhorias significativas na resistência à tração em comparação com a mistura de referência. Em condições secas, o ITS aumentou em 11,9% na M15 e em 9,7% na M20, em relação à mistura de referência. Em condições húmidas, os valores foram ainda mais notáveis, com um aumento de 17,6% para a M15 e 24,0% para a M20. Apesar dessas melhorias, é importante considerar que as misturas betuminosas apresentam alguma porosidade refletindo-se na capacidade de absorver água, o que pode levar a alterações físicas e químicas prejudiciais ao desempenho do pavimento. Recomenda-se o uso de aditivos impermeabilizantes para mitigar esses efeitos adversos melhorando a resistência à tração sob condições desfavoráveis, como a exposição à água.

A rigidez das misturas betuminosas é uma propriedade que permite avaliar a sua resistência e flexibilidade. Os resultados indicam que, em geral, uma maior rigidez implica uma maior resistência às deformações permanentes, mas também uma menor flexibilidade, o que pode aumentar a suscetibilidade à formação de fissuras por fadiga. A mistura betuminosa MR apresenta valor de Módulo de Rigidez menor que as misturas M15 e M20. Isto deve-se, essencialmente, à presença do betume envelhecido e de baixa penetração da MBR. A MR, por ser menos rígida que as misturas M15 e M20, é mais flexível e, conseqüentemente, mais propensa a deformações permanentes sob cargas repetidas. No entanto, é importante destacar que uma rigidez excessiva pode levar à fragilidade ao longo do tempo, resultando em fissuras por fadiga. Assim, é necessário um equilíbrio ótimo na rigidez para garantir uma

resistência adequada contra deformações permanentes e fadiga, minimizando danos prematuros.

O ensaio com simulador de tráfego permitiu determinar o WTS que é um indicador para avaliar a resistência à deformação permanente de uma mistura betuminosa. Um valor mais alto de WTS indica uma maior tendência à deformação permanente, enquanto um valor mais baixo sugere menor deformação. Os resultados da realização deste ensaio revelam que a mistura M15 apresenta uma deformação permanente significativamente maior em comparação com as misturas MR e M20. A mistura M20 exibe menor deformação devido à presença de maior quantidade de MBR e, conseqüentemente, de betume envelhecido com menor penetração. Em termos percentuais, a mistura M20 apresenta uma melhor resistência em comparação com a MR e com a M15 em 44% e 65%, respectivamente.

Sugere-se realizar mais estudos experimentais para otimizar a formulação de misturas betuminosas que incorporem MBR. Isso implica realizar ensaios com diferentes percentagens de MBR e outros aditivos para determinar a combinação ótima que melhore o desempenho mecânico dos pavimentos. Além disso, podem ser exploradas técnicas de modelação e simulação para prever o comportamento dessas misturas sob diversas condições atmosféricas e também de carga, o que ajudaria a otimizar a sua formulação.

Uma perspectiva interessante para futuros trabalhos seria combinar aditivos, como aditivos poliméricos, com MBR para desenvolver uma formulação otimizada que permita a melhoria das propriedades da mistura. Em seguida, seria importante aplicar a mistura num local que permitisse a monitorização do seu desempenho a longo prazo em condições reais de tráfego.

Referências bibliográficas

- Abedeh, R. (2017). Effect of Waste Glass on Properties of Asphalt Concrete Mixtures. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 11. Obtido de https://www.researchgate.net/publication/325430398_Effect_of_Waste_Glass_on_Properties_of_Aspphalt_Concrete_Mixtures
- Adesina, A., & Das, S. (2021). Crack properties, toughness and absorption evaluation of FRCC incorporating reclaimed asphalt pavement and crumb rubber as aggregates. *Cleaner Materials*, 1, 100004. doi:<https://doi.org/10.1016/j.clema.2021.100004>
- Ahmadinia, E., Zargar, M., Rehan, K., Abdelaziz, M., & Shafigh, P. (2011). Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt. *Materials & Design*, 32, 4844 - 4849. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.06.016>
- Ahmadinia, E., Zargar, M., Rehan, M., Abdelaziz, M., & Shafigh, P. (2011). Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt. *Materials & Design*, 32, 48444 - 4849. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.06.016>
- Ahmedzade, P., & Sengoz, B. (2009). Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete. *Journal of Hazardous Materials*, 165, 300 - 305. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.09.105>
- Akbulut, H., & Gürer, C. (2007). Use of aggregates produced from marble quarry waste in asphalt pavements. *Building and Environment*, 1921 - 1930. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.03.012>
- Al - Hadidy, A. I., & Yi - qui, T. (2009). Effect of polyethylene on life of flexible pavements. *Construction and Building Materials*, 23, 1456 - 1464. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.07.004>
- Alam, M., Arulrajah, A., & Ali, Y. (2012). Possible environmental impacts of recycled glass used as a pavement base material. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 30. Obtido de https://www.researchgate.net/publication/225043621_Possible_environmental_impacts_of_recycled_glass_used_as_a_pavement_base_material
- Alarcón Ibarra, J. (2015). Reciclado de pavimentos asfálticos en caliente en planta. Obtido de <https://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/5906/10CAPITULO3.pdf?sequence=>

- Almeida, A., Capitaio, S., Bandeira, R., Fonseca, M., & Santos, L. (2020). Performance of AC mixtures containing flakes of LDPE plastic film collected from urban waste considering ageing. *Construction and Building Materials*, 232, 117253. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117253>
- Angelone, S. M., Cauhapé, M. L., Borghi, M., & Martinez, F. (2015). Green pavements: reuse of plastic waste in asphalt mixtures. *Materials and Structures*. Obtido de https://www.researchgate.net/publication/276930312_Green_pavements_reuse_of_plastic_waste_in_asphalt_mixtures
- Antão, A. M. (2001). Os recursos minerais na Beira Baixa. *Associação Portuguesa de Geólogos, Geonovas*.(15), 45-59.
- Anupiya, S., Perera, M., Zhu, H., Saberian, M., Liu, M., Cameron, D., . . . Li, J. (2021). Application of Glass in Subsurface Pavement Layers: A Comprehensive Review. *Sustainable Roads and Airfields: Pavement Materials and Pavement Engineering*, 13(21), 11825. doi:<https://doi.org/10.3390/su132111825>
- Arisha, A., Gabr, A., El - Baday, S., & Shwalli, S. (2016). Using Blends of Construction & Demolition Waste Materials and Recycled Clay Masonry Brick in Pavement. *Procedia Engineering*, 143, 1317 - 1324. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.148>
- Arulrajah, A., Younis Ali, M., & Disfani, M. (2013). Recycled-Glass Blends in Pavement Base/Subbase Applications: Laboratory and Field Evaluation. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(7), 04014025. Obtido de https://www.researchgate.net/publication/273370484_Recycled-Glass_Blends_in_Pavement_BaseSubbase_Applications_Laboratory_and_Field_Evaluation
- Asi, I., Qasrawi, H., & Shalabi, F. (2007). Use of steel slag aggregate in asphalt concrete mixes. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 34(8), 902 - 911. Obtido de https://www.researchgate.net/publication/233651731_Use_of_steel_slag_aggregate_in_asphalt_concrete_mixes#:~:text=It%20was%20found%20that%20replacing,was%20the%20optimal%20replacement%20level.
- Athanasopouloi, A. (2014). Fly ash exploited in pavement layers in environmentally friendly ways. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 97, 43 - 50. doi:<https://doi.org/10.1080/02772248.2015.1005090>

- Attaellmanan, M., Feng, C. P., & Ai, H. (2011). Laboratory evaluation of HMA with high density polyethylene as a modifier. *Construction and Building Materials*, 25, 2764 - 2770. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.037>
- Bahia, H., Perdomo, D., & Turner, P. (1997). Applicability of Superpave Binder Testing Protocols to Modified Binders. *Sage Journals*, 1586. doi:<https://doi.org/10.3141/1586-03>
- Barral, M., Navarro, J. A., García Siller, A., & Cembrero, M. (2023). Experiencia en obra con una mezcla bituminosa reciclada templada con alta tasa de material de fresado. (C. M. Carretera, Ed.) *CEPSA*. Obtido de <https://www.cepsa.es/stfls/comercial/FICHEROS/06-Reciclado-templado-en-subida-Aranzazu.pdf>
- Belhaj, M., & Valentin, J. (2023). Comparative Study of The Asphalt Mix Stiffness Modulus Using Selected Test Methods – 2-Point Bending Test, 4-Point Bending Test and Indirect Tensile Test. *Transportation Research Procedia*, 74, 1110 - 1117. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.250>
- Bilgen, G., & Faruk Altuntas, O. (2023). Sustainable re-use of waste glass, cement and lime treated dredged material as pavement material. *Case studies in Construction Materials*, 18, 1815. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01815>
- Birlie Genet, M., Barantie Sendekie, Z., & Lemessa Jembere, A. (2023). Investigation and optimization of waste LDPE plastic as a modifier of asphalt mix for highway asphalt: Case of Ethiopian roads. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 200250. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100150>
- Blight, G. (2011). Chapter 5 - Mine Waste: A Brief Overview of Origins, Quantities, and Methods of Storage. *Waste*, 77 - 88. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381475-3.10005-1>
- Borges Miranda, H. M., Rato, M., & Domingues, D. (2023). Should Brisa start using recycled plastics in its pavements? *Transportation Research Procedia*, 981 - 988. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.526>
- Cameron, D. A., Azam, A. M., & Rahman, M. (2012). Recycled Clay Masonry and Recycled Concrete Aggregate Blends in Pavement. *Geotechnical Special Publication*. Obtido de https://www.researchgate.net/publication/268589292_Recycled_Clay_Masonry_and_Recycled_Concrete_Aggregate_Blends_in_Pavement

- Cedik, A. (2020). A review on the evaluation of the potential utilization of construction and demolition waste in hot mix asphalt pavements. *Resources, Conservation and Recycling*, 161, 104956. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104956>
- Cetin, A., Tuncan, M., & Tuncan, A. (2003). The use of waste materials in asphalt concrete mixtures. *Construction Engineering*, 21. Obtido de https://www.researchgate.net/publication/10765987_The_use_of_waste_materials_in_asphalt_concrete_mixtures
- Chandra, S., Kumar, P., & Abesha, B. (2001). Use of Marble Dust in Road Construction. *Road Materials and Pavement Design*, 317 - 330. doi:<https://doi.org/10.1080/14680629.2002.9689928>
- Chang Guo, Y., Xie-Mi, L., Zhang, J., & Lin, J. (2023). A review on the influence of recycled plastic aggregate on the engineering properties of concrete. *Journal of Building Engineering*, 79, 107787. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107787>
- Choudhary, J., Kumar, B., & Gupta, A. (2020). Utilization of solid waste materials as alternative fillers in asphalt mixes: A review. *Construction and Building Materials*, 234. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117271>
- Chuman Aguirre, J. M. (2017). Reutilización de pavimento flexible envejecido mediante el empleo de una planta procesadora de mezcla asfáltica en caliente para pavimentos. *Universidad Peruana de los Andes*. Obtido de <https://repositorio.upla.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12848/267/JORGE%20MANUEL%20CHUMAN%20AGUIRRE.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Costa, L., Peralta, J., Oliveira, J. R., & Silva, H. M. (2017). A New Life for Cross-Linked Plastic Waste as Aggregates and Binder Modifier for Asphalt Mixtures. *Applied Sciences*, 7(6). doi:<https://doi.org/10.3390/app7060603>
- CSIC. (2019). Picrometría de Helio. (I. d. Petroleoquímica, Ed.) *Consejo Superior de Investigaciones Científicas*. Obtido de https://icp.csic.es/archivos/uapoyo/Castellano/Solicitud%20y%20anexo/2020/Descripcion%20Picnometria_02.pdf
- Dalhat, M. A., & Al-Abdul, H. (2015). Performance of recycled plastic waste modified asphalt binder in Saudi Arabia. *International Journal of Pavement Engineering*, 1 - 9. Obtido de https://www.researchgate.net/publication/282431400_Performance_of_recycled_plastic_waste_modified_asphalt_binder_in_Saudi_Arabia

- Disfani, M. M., Arulrajah, A., & Bo, M. W. (2012). Environmental risks of using recycled crushed glass in road applications. *Journal of Cleaner Production*, 20, 170 - 179. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.07.020>
- Duan, K., Wang, C., Liu, J., Song, L., Chen, Q., & Chen, Y. (2022). Research progress and performance evaluation of crumb-rubber-modified asphalts and their mixtures. *Construction and Building Materials*, 361, 129687. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129687>
- EAPA. (2021). EAPA Asphalt in Figures 2020 – Slight reductions in total production after the first year of the pandemic. Obtido de <https://epa.org/press-release-asphalt-in-figures-2020/>
- El - Assaly, A., & Ellis, R. (2009). Evaluation of recycling waste materials and by-products in highway construction. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 8, 299 - 308. doi:<https://doi.org/10.1080/13504500109470088>
- Fang, C., Yu, R., Zhang, Y., & Hu, J. (2012). Combined modification of asphalt with polyethylene packaging waste and organophilic montmorillonite. *Polymer Testing*, 276 - 281. doi:<https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2011.11.008>
- Fuentes - Audén, C., Sandoval, J. A., Jerez, A., Navarro, F. J., Martínez - Boza, F., Partal, P., & Gallegos, C. (2008). Evaluation of thermal and mechanical properties of recycled polyethylene modified bitumen. *Polymer Testing*, 27, 1005 - 1012. doi:<https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2008.09.006>
- Gedik, A. (2021). An exploration into the utilization of recycled waste glass as a surrogate powder to crushed stone dust in asphalt pavement construction. *Construction and Building Materials*, 300, 123980. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123980>
- Genesseaux Lopez, M. d. (2015). Avaliação da durabilidade de misturas asfálticas a quente e mornas contendo material asfáltico fresado. *Universidade de Sao Paulo*. doi:<https://doi.org/10.11606/T.3.2016.tde-14072016-145634>
- Gonzalez, O., Peña, J., Muñoz, M., Santamaría, A., Pérez-Lepe, A., Martínez - Boza, F., & Gallegos, C. (2022). Rheological Techniques as a Tool To Analyze Polymer–Bitumen Interactions: Bitumen Modified with Polyethylene and Polyethylene-Based Blends. *Energy & fuels*, 1258 - 1263. doi:<https://doi.org/10.1021/ef020049l>
- Haider, S., Hafeez, I., Jamal, Ullah, & Rafi. (2020). Sustainable use of waste plastic modifiers to strengthen the adhesion properties of asphalt mixtures. *Construction*

- and Building Materials*, 117496.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117496>
- Herrador, R., Pérez, P., Garach, L., & Ordóñez García, J. (2011). Use of Recycled Construction and Demolition Waste Aggregate for Road Course Surfacing. *Journal of Transportation Engineering*, 138. doi:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000320](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000320)
- Huang, Y., Roger, B., & Hidrich, O. (2007). A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements. *Resources, Conservation and Recycling*, 52, 58 - 73. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.02.002>
- Ibrahim Al-Hadidy, A. R. (s.d.). Evaluation of Pyrolysis Polypropylene Modified Asphalt Evaluation of Pyrolysis Polypropylene Modified Asphalt Paving Materials. *AL-Rafdain Engineering Journal (AREJ)*. doi:<https://doi.org/10.33899/rengj.2006.46555>
- Ipanaque Paiva, G., & Ramos Vilcarromero, G. M. (2014). Reciclado de pavimentos asfálticos y su reutilización para el diseño de mezcla de asfalto en caliente. *Universidad Señor de Sipán*. Obtido de [https://repositorio.uss.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12802/1079/INGENIER%
%c3%8da%20CIVIL.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.uss.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12802/1079/INGENIER%c3%8da%20CIVIL.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Jafar, J. J. (2016). Utilisation of waste plastic in bituminous mix for improved performance of roads. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 243 - 249. doi:<https://doi.org/10.1007/s12205-015-0511-0>
- Jia Boom, Y., Xuan, D. L., Enfrin, M., Swaney, M., Massod, H., Kumar Pramanik, B., . . . Giustozzi, F. (2023). Engineering properties, microplastics and emissions assessment of recycled. *Science of the Total Environment*, 893, 164869. Obtido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723034927>
- Kamada, O., & Yamada, M. (2002). Utilization of waste plastics in asphalt mixtures. *Memoirs of the Faculty of Engineering*, 43, 111 - 118. Obtido de <https://core.ac.uk/download/pdf/35261976.pdf>
- Kang, D.-H., Gupta, S., Ranaivoson, A. Z., Siekmeier, J., & Roberson, R. (2011). Recycled Materials as Substitutes for Virgin Aggregates in Road Construction: I. Hydraulic and Mechanical Characteristics. *Soil Science Society of America Journal*, 75, 1265-1275. Obtido de <https://doi.org/10.2136/sssaj2010.0295>

- Khosla, P. N., Nair, H., Visintine, B., & Malpass, G. (2012). Effect of Reclaimed Asphalt and Virgin Binder on Rheological Properties of Binder Blends. (C. S. Engineering, Ed.) *International Journal of pavement research and technology*, 5(5), 317-325. Obtido de <http://www.ijprt.org.tw/reader/pdf.php?id=254>
- Krayushkina, K., Prentkovskis, O., Bieliatynskiy, A., & Junevicius, R. (2012). Use of steel slags in automobile road construction. *Transport*, 27(2), 129 - 137. doi:<https://doi.org/10.3846/16484142.2012.690093>
- Kubiczek, J., Derej, W., Hadasik, B., & Matuszewska, A. (2023). Chemical recycling of plastic waste as a mean to implement the circular economy model in the European Union. *Journal of Cleaner Production*, 406, 136951. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136951>
- Kumar Gautam, P., Pawan, K., Singh Jethoo, A., Agrawal, R., & Singh, H. (2018). Sustainable use of waste in flexible pavement: A review. *Construction and Building Materials*(180), 239 - 253. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.067>
- L., F. (1993). Recycled plastic finds home in asphalt binder. *Scranton Gillette Communications*, 31(3), 41 - 47. Obtido de <https://trid.trb.org/view/372099>
- Leng, Z., Sreeram, A., Kumar Padhan, R., & Tan, Z. (2018). Value-added application of waste PET based additives in bituminous mixtures containing high percentage of reclaimed asphalt pavement (RAP). *Journal of Cleaner Production*, 615 - 625. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.119>
- Linyi, Y., Lan, J., Chen, R., & Jiang, J. (2022). Environmental and economic assessment of collective recycling waste plastic and reclaimed asphalt pavement into pavement construction: A case study in Hong Kong. *Journal of Cleaner Production*, 336, 130405. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130405>
- López Domínguez, M. G., Pérez Salazar, A., & Garnica Anguas, P. (2014). Estado del arte sobre el uso de residuos y sub productos industriales en la construcción de carreteras. *Instituto Mexicano del Transporte ISSN 0188 - 7297*. Obtido de <https://imt.mx/download-archivo.html?l=YXJjaGl2b3MvUHVibGljYWNpb25lcy9QdWJsaWNhY2lvdmlRlY25pY2EvcHQzOTQucGRm>
- Lugeiyamu, L., Kunlin, M., Mensahn, E., & Faraz, A. (2021). Utilization of waste polyethylene terephthalate (PET) as partial replacement of bitumen in stone mastic asphalt. *Construction and Building Materials*, 125176. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125176>

- Maghool, F., Arulrajah, A., Ghorbani, B., & Suksun, H. (2022). Strength and permanent deformation properties of demolition wastes, glass, and plastics stabilized with foamed bitumen for pavement bases. *Construction and Building Materials*, 320, 126108. Obtido de <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126108>
- Maniruzzaman, A., Rahman, T., Hainin, R., & Wan Abu, W. (2015). An overview on alternative binders for flexible pavement. *Construction and Building Materials*, 84, 315 - 319. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.068>
- Marques, M. O., Cunha, N. L., & Rezende, L. R. (2015). The use of non-conventional materials in asphalt pavements baseRoad Materials and Pavement Design. *Road Materials and Pavement Design*, 16, 799 - 814. doi:<https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1055334>
- Mashaan, N., & Karim, M. (2014). Waste tyre rubber in asphalt pavement modification. *Materials Research Innovations*, 18. doi:<https://doi.org/10.1179/1432891714Z.000000000922>
- Mistry, R., Karmakar, S., & Kumar, T. (2019). Experimental evaluation of rice husk ash and fly ash as alternative fillers in hot-mix asphalt. *Road Materials and Pavement Design*, 20, 979 - 990. doi:<https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1422791>
- Modarres, A., & Ayar, P. (2015). Comparing the mechanical properties of cold recycled mixture containing coal waste additive and ordinary Portland cement. *International Journal of Pavement Engineering*, 17, 211 - 224. doi:<https://doi.org/10.1080/10298436.2014.979821>
- Montejo Fonseca , A. (2002). Ingeniería de Pavimentos para carreteras. *Universidad Católica de Colombia Ediciones y Publicaciones*. Obtido de https://www.academia.edu/22782711/Ingenieria_de_pavimentos_Alfonso_Montejo_Fonseca
- Moschen-Schimek, J., Kasper, T., & Huber - Humer, M. (2023). Critical review of the recovery rates of construction and demolition waste. *Waste Management*, 167, 150 - 164. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.05.020>
- Movilla - Quesada, D., Raposeiras, A. C., Silva - Kein, L. T., Lastra , González, & Catro, F. (2019). Use of plastic scrap in asphalt mixtures added by dry method as a partial substitute for bitumen. *Waste Management*, 751 - 760. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.03.018>

- Museu Nacional de História Natural e da Ciência. (2004). *Jóias da Terra: o minério da Panasqueira*. (U. d. Lisboa, Editor) Obtido de <https://museus.ulisboa.pt/joias-da-terra-o-o-minerio-da-panasqueira>
- Nandal, M., Sood, H., & Kumar Gupta, P. (2023). A review study on sustainable utilisation of waste in bituminous layers of flexible pavement. *Case Studies in Construction Materials*, 19. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02525>
- Neves, J., & Freire, A. C. (2022). Special Issue “The Use of Recycled Materials to Promote Pavement Sustainability Performance”. 7. doi:<https://doi.org/10.3390/recycling7020012>
- Noor, A., & Muhammad, A. U. (2022). A mini-review on the use of plastic waste as a modifier of the bituminous mix for flexible pavement. 4. doi:<https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100059>
- Paranavithana, S., & Mohajerani, A. (2006). Effects of recycled concrete aggregates on properties of asphalt concrete. *Resources, conservation, and recycling*, 48, 1 - 12. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2005.12.009>
- Paseto, M., & Baldo, N. (2012). Laboratory investigation on foamed bitumen bound mixtures made with steel slag, foundry sand, bottom ash and reclaimed asphalt pavement. *Road Materials and Pavement Design*, 13, 691 - 712. doi:<https://doi.org/10.1080/14680629.2012.742629>
- Pei, Z., Yi, J., Xu, M., Ai, X., Cao, J., Hu, W., . . . Feng, D. (2023). Exploration of the design theory of crack-resistant rejuvenator for warm-mix recycled asphalt mixtures with high RAP contents. *Cleaner Production*, 388. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135855>
- Rahman, T., Mohajerani, A., & Giustozzi, F. (2020). Possible Recycling of Cigarette Butts as Fiber Modifier in Bitumen for Asphalt Concrete. *Novel Sustainable Technologies for Recycling Waste Materials*, 13, 734. doi:<https://doi.org/10.3390/ma13030734>
- Restrepo Sierra, H. A., & Stephens Zapata, S. A. (2015). Estudio de las ventajas económicas del reciclaje en frío in situ de pavimentos asfálticos. *Universidad de Medellín*. Obtido de <https://core.ac.uk/download/pdf/51196278.pdf>
- Riberito de Rezne de, L., Ramos da Silveira, L., Lima de Araújo, W., & Pereira da Luz, M. (2013). Reuse of Fine Quarry Wastes in Pavement: Case Study in Brazil. *Materials in Civil Engineering*, 26(8). doi:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000997](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000997)

- Rondón, H. A., Muniz, M., & Reyes, F. A. (2017). Uso de escorias de alto horno y acero en mezclas asfálticas: revisión. *Universidad de Medellín*. Obtido de <https://revistas.udem.edu.co/index.php/ingenierias/article/download/1993/2545/>
- Sahafi, B., Al Nageim, H., & Visulios, P. (2013). Use of waste limestone dust and steel slag in UK highways type 1 unbound mixtures. *Construction Materials*, 166, 99 - 107. Obtido de <https://doi.org/10.1680/coma.11.00029>
- Salem, Y. (2014). From plastic to pavement: Another example of creative waste management. *Sustainable Cities*. Obtido de <https://blogs.worldbank.org/sustainablecities/plastic-pavement-another-example-creative-waste-management>
- Saltaan, M., & Findik, S. (2008). Stabilization of subbase layer materials with waste pumice in flexible pavement. *Building and Environment*, 43, 415 - 421. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.01.007>
- Saltaan, M., Kavlak, Y., & Ertem, S. (2011). Utilization of Pumice Waste for Clayey Subgrade of Pavements. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(12). doi:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.000033](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.000033)
- Santos, A., Venancio, C., & Oliveria, M. (2023). Knowledge, concerns and attitudes towards plastic pollution: An empirical study of public perceptions in Portugal. *Science of The Total Environment*, 906, 167784. Obtido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723064112>
- Santos, L., Fonseca, M., Almeida, A., & Capitao, S. (2020). Performance of AC mixtures containing flakes of LDPE plastic film collected from urban waste considering ageing. *Construction and Building Materials*, 117253. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117253>
- Segui, P., Mahdi, A., Amrani, M., & Mostafa, B. (2023). Mining Wastes as Road Construction Material: A Review. 13, 90. doi:<https://doi.org/10.3390/min13010090>
- Shu, X., & Huang, B. (2014). Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete: An overview. *Construction and Building Materials*, 67, 217 - 224. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.027>
- Si, W., Yin, Y., Cao, D., Hu, Y., Xingxiang, K., Liu, J., . . . Gu, Q. (2022). Performance of a pavement optical coating prepared with tungsten bronze nanoparticle. *Construction*

- and Building Materials*, 340, 127700.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127700>
- Sojobi, A., Emeka, S., & Oluwasegun, A. (2016). Recycling of polyethylene terephthalate (PET) plastic bottle wastes in bituminous asphaltic concrete. *Cogent Engineering*.
Obtido de https://www.researchgate.net/publication/290601133_Recycling_of_polyethylene_terephthalate_PET_plastic_bottle_wastes_in_bituminous_asphaltic_concrete
- Su, N., & Chen, J. S. (2002). Engineering properties of asphalt concrete made with recycled glass. *Resources, Conservation and Recycling*, 35, 259-274.
doi:[https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(02\)00007-1](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(02)00007-1)
- Taha, Y., Benarchid, Y., & Benzaazoua, M. (2021). Environmental behavior of waste rocks based concrete: Leaching. *Resources Policy*, 74, 101419.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101419>
- Tran, H. B., & Phan, V. T.-A. (2024). Potential usage of fly ash and nano silica in high-strength concrete: laboratory experiment and application in rigid pavement. *Case Studies in Construction Materials*, e02856.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02856>
- Tuncan, M., Tuncan, A., & Cetin, A. (2003). The use of waste materials in asphalt concrete mixtures. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*. doi:<https://doi.org/10.1177/0734242X0302100202>
- Tushar, Q., Salehi, S., Joao, S., Zhang, G., Bhuiyan, M., Arashpour, ,, & Giustozzi, F. (2023). Application of recycled crushed glass in road pavements and pipeline bedding: An integrated environmental evaluation using LCA. *Science of The Total Environment*, 881, 163488. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163488>
- United Nations. (2023). THE 17 GOALS. *Department of Economic and Social Affairs*.
Obtido de <https://sdgs.un.org/goals>
- Vanitha, S., Venugopal, N., & Omprakaash, P. (2015). Utilisation of Waste Plastics as a Partial Replacement of Coarse Aggregate in Concrete Blocks. *Environmental Engineering*. doi:[10.17485/ijst/2015/v8i12/54462](https://doi.org/10.17485/ijst/2015/v8i12/54462)
- Vasudevan, R., Chandra Sekar, R., Sundarakannan, B., & Velkennedy, R. (2002). A technique to dispose waste plastics in an ecofriendly way – Application in construction of flexible pavement. *Construction and Building Materials*, 28, 311 - 320. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.031>

- Vasudevan, R., Chandra Sekar, R., Sundarakannan, B., & Velkennedy, R. (2012). A technique to dispose waste plastics in an ecofriendly way – Application in construction of flexible pavements. *Construction and Building Materials*, 28, 311 - 320. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.031>
- Victory, W. (2022). A review on the utilization of waste material in asphalt pavements. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 27279–27282. doi:<https://doi.org/10.1007/s11356-021-18245-0>
- Wang, X., Pan, P., Deming, L., & Jiale, L. (2023). Investigation on heat transfer mechanism of asphalt pavement in winter transportation: An experimental and numerical study. *Cold Regions Science and Technology*, 104077. doi:<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2023.104077>
- World Wildlife Fund. (2018). *Una trampa de plástico: Liberando de plástico el mediterráneo*. Obtido de <https://docs.gestionaweb.cat/0673/informe-mediterraneo-la-trampa-de-plastico-wwf-informe-mediterraneo-la-trampa-de-plastico-wwf.pdf>
- Xu, L., Deng, Y., Ni, H., Sun, D., Ling, S., & Tian, Y. (2023). Effect of aging on damping properties of rubberized asphalt binder and rubberized porous asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 411, 134743. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134743>
- Xue, Y., Liu, C., Jianjiao, Q., Songtao, L., Zihao, J., Ding, S., . . . Ren, K. (2023). Research on pavement performance of recycled asphalt mixture based on separation technology of asphalt and aggregate in RAP. *Construction and Building Materials*, 393, 132103. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132103>
- Yildirim, Y. (2007). Polymer modified asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 66 - 72.
- Yonus Ali, M. M., Newman, G., Arulrajah, A., & Disfani, M. (2011). Application of recycled glass - Crushed rock blends in road pavements. *Australian Geomechanics Journal*, 46, 113 - 121. Obtido de https://www.researchgate.net/publication/288138717_Application_of_recycled_glass_-_Crushed_rock_blends_in_road_pavements
- Zamanillo, Á., Calzada, M., Sánchez, E., & Gonzalo, H. (2014). Density, Adhesion and Stiffness of Warm Mix Asphalts. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 160, 323 - 331. doi:<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.12.144>

- Zhan, Y., Zhiwei, L., Xiuquan, L., Nie, Z., Deng, Q., Qiu, Y., & Wang, T. (2023). Pavement preventive maintenance decision-making for high antiwear and optimized skid resistance performance. *Construction and Building Materials*, 400, 132757. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132757>
- Zhang, D., Bu, W., Wang, Q., Liu, P., Zhuhai, S., Liu, X., . . . Zhou, Y. (2023). A review of recent developments and challenges of using phase change materials for thermoregulation in asphalt pavements. *Construction and Building Materials*, 400, 132669. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132669>
- Zhao, W., & Yang, Q. (2023). Life cycle assessment and multi-index performance evaluation of semi-flexible pavement after composite modification by using fly ash, rubber particles, warm mixing asphalt and recycled asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 364, 129945. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129945>
- Zhao, W., & Yang, Q. (2023). Life-cycle assessment of sustainable pavement based on the coordinated application of recycled asphalt pavement and solid waste: Environment and economy. *Cleaver Production*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140203>
- Zhengwu, L., You, L., You, Z., Ge, D., Yang, X., Xu, F., . . . Diab, A. (2022). Review of recycling waste plastics in asphalt paving materials. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 9, 742 - 764. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.07.002>

Acervo Normativo

EN 12697-35:2004	Bituminous mixtures - test methods for hot mix asphalt – Part 35: Laboratory mixing
EN 12697-30:2004	Bituminous mixtures - test methods for hot mix asphalt - Part 30: Specimen preparation by impact compactor
EN 12697-5:2002	Bituminous mixtures - test methods for hot mix asphalt - Part 5: Determination of the maximum density
EN 12697-6:2003	Bituminous mixtures - test methods for hot mix asphalt - Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens
EN 12697-8:2003	Bituminous mixtures - test methods for hot mix asphalt - Part 8: Determination of void characteristics of bituminous specimens
EN 12697-34:2004	Bituminous mixtures - test methods for hot mix asphalt – Part 34: Marshall test
EN 12697-12:2003	Bituminous mixtures - test methods for hot mix asphalt – Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens
EN 12697-29:2002	Bituminous mixtures - test method for hot mix asphalt - Part 29: Determination of the dimensions of a bituminous specimen
EN 12697-23:2003	Bituminous mixtures - test methods for hot mix asphalt – Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens
EN 12697-26:2004	Bituminous mixtures - test methods for hot mix asphalt – Part 26: Stiffness
EN 12697-22:2003	Bituminous mixtures - test methods for hot mix asphalt – Part 22: Wheel tracking