

POTENCIALIDADES E FRAGILIDADES NA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS EM MISTURAS BETUMINOSAS

Manuel Caló¹, Cecília Vale¹

¹CONSTRUCT, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, Rua Dr. Roberto Frias, s/n 4200-465, Porto, Portugal

email: up199401027@edu.fe.up.pt , cvale@fe.up.pt

<https://paginas.fe.up.pt/~dec/>

Sumário

Nas últimas décadas tem sido estudada a possibilidade de aplicar nas misturas betuminosas uma grande variedade de materiais não convencionais em substituição de agregados naturais, como por exemplo: resíduos plásticos; resíduos de construção e demolição (RCDs); misturas betuminosas recuperadas (RAs); borracha e agregados siderúrgicos. Ainda assim, e apesar da produção científica apresentar indicadores positivos, esta não é prática nacional corrente, podendo ser apontados motivos para o desinteresse na utilização destes materiais na construção das infraestruturas de transporte, tais como: a perceção de custos acrescidos, a falta de confiança na qualidade desses materiais e a informação técnica insuficiente. Ciente do papel que a reciclagem de materiais pode contribuir para o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) fixados pela Assembleia Geral das Nações Unidas, em particular os ODS 7 e 9, este trabalho apresenta uma breve revisão da literatura sobre a aplicação de resíduos nas misturas betuminosas a quente de modo a identificar as potencialidades e as fragilidades da utilização de resíduos plásticos, RCDs, RAs, borracha e agregado siderúrgico. Pela pesquisa realizada, pode dizer-se que todos os resíduos enunciados revelam potencialidades, mas também fragilidades, necessitando ainda, contudo, de estudos laboratoriais extensivos para a sua validação como agregados.

Palavras-chave: Resíduos, mistura betuminosa, inovação, sustentabilidade.

1 INTRODUÇÃO

O consumo da sociedade tem impactos significativos no meio ambiente dado que conduz à produção de resíduos urbanos e industriais, sem que haja uma solução fácil para o seu destino, à libertação de gases nocivos no processo de incineração e a custos energéticos elevados na extração de materiais naturais. Simultaneamente, na área dos transportes há uma crescente exigência da população e maior compromisso das autoridades para o bom funcionamento das infraestruturas. Estradas com traçados que proporcionam maior segurança e conforto, exigem maior largura de plataforma, grandes raios de curvatura, menores inclinações longitudinais e, por isso, requerem maiores quantidades de material a transportar, quer em movimentos de terra, quer na produção de misturas. Na EU-27, por exemplo, em 2020, foram necessárias 208,3 Mt e em Portugal 3,4 Mt de misturas [1] para a expansão e reabilitação da rede rodoviária. A crescente consciencialização destes problemas, leva à procura de soluções inovadoras que deverão traduzir-se num uso mais criterioso dos materiais naturais, por um lado, e conferir à reciclagem um papel relevante na construção das infraestruturas de transporte. Este trabalho apresenta uma breve revisão da literatura sobre a possibilidade de substituição de agregado natural por plásticos, RCDs, MBRs, borracha e agregado siderúrgico, procurando conhecer os impactos da utilização desses resíduos nas características mecânicas e ambientais das misturas modificadas.

2 PROCESSOS DE ADIÇÃO DE RESÍDUOS EM MISTURAS BETUMINOSAS

O tipo, a dimensão e a forma do resíduo, as características da estrada e as práticas construtivas locais condicionam a escolha que, por seu turno, trará consequências no desempenho estrutural e/ou funcional da camada na qual o resíduo é adicionado [2]. Existem dois processos de adição de resíduos em misturas: o processo por **via seca** e o processo por **via húmida** e cujas etapas estão representadas na Figura 1.

Na adição por **via seca** há a substituição parcial do agregado. O resíduo é lavado e triturado em partículas com dimensão inferior à dimensão máxima do agregado natural e despejado diretamente na mistura. Esta substituição

conduz a alguma redução dos custos, sendo também encontradas referências à melhoria das características estruturais e funcionais, mas aumentam, contudo, a incerteza relativamente ao desempenho a longo prazo da mistura. Este processo de adição, é de mais fácil implementação por não exigir mudanças significativas nas centrais betuminosas [3] e no caso de o resíduo ser o plástico ou a borracha, estes devem ter o ponto de fusão superior à temperatura usada na produção dessa mistura. Alguns termoplásticos podem ser previamente moldados em pastilhas com as propriedades geométricas desejadas e depois usadas como agregado secundário. De referir ainda um processo particular de adição por via seca, no qual o agregado é revestido pelo plástico (*plastic coated aggregates*). O calor amolece-o e reveste o agregado que posteriormente será misturado com o betume [4][5][6].

No caso da adição por **via húmida**, o resíduo em pó é adicionado ao betume antes de ser misturado com o agregado [7]. A substituição de massa de betume conduz a uma maior redução de custos de produção por unidade de massa da mistura do que os do processo por via seca devido ao maior custo do betume em comparação com o do agregado. Este processo poderá modificar as propriedades do betume e, por conseguinte, ter consequências ou não, nas propriedades da mistura obtida. Se houver modificação das propriedades, designam-se os resíduos por *bitumen modifiers*. Se houver apenas substituição designam-se os resíduos por *bitumen replacers* e neste caso a vantagem é meramente económica. No caso de haver modificação das propriedades, este processo é semelhante à modificação corrente do betume com outros aditivos comercializados (EVA, enxofre, borracha, etc.) [8]. De referir ainda que para se obter uma mistura uniforme do ligante betume/resíduo, é necessário equipamento suficientemente potente para se obter um ligante homogéneo, mas se o betume modificado ao ser armazenado a altas temperaturas por um período longo de tempo e sem agitação, pode levar à segregação dos componentes com consequências negativas na uniformidade [3]. Como as misturas são efetuadas a temperaturas inferiores a 180°C, alguns plásticos cujo ponto de fusão seja superior estão ainda em estado sólido impedindo um bom envolvimento com o betume, razão pela qual o polietileno de baixa e de alta densidade (LDPE e HDPE) são adequados para este processo, ao contrário do polietileno tereftalato (PET) ou do poliestireno (PS). Segue-se um quadro resumo (Quadro 1) com indicação das vantagens e desvantagens de cada processo de aplicação de resíduos em misturas betuminosas.

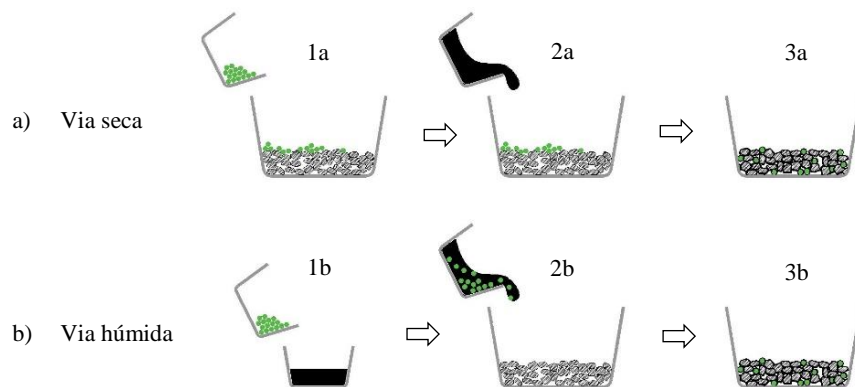


Figura 1 – Processos de adição por via seca e via húmida. No processo por via seca, o resíduo (representado a cor verde) é adicionado diretamente na mistura (etapa 1a) antes da adição do betume (etapa 2a). Por via húmida, o resíduo em pó é previamente adicionado ao betume (1b) antes da sua adição na mistura (2b).

Quadro 1 - Vantagens e desvantagens nos processos de aplicação

Via	Vantagens	Desvantagens
Seca	<ul style="list-style-type: none"> - Possibilita normalmente a introdução de maior quantidade de resíduo. - Não requer mudanças significativas nas centrais de mistura betuminosa 	<ul style="list-style-type: none"> - Confere maior incerteza no comportamento da mistura betuminosa. - No caso de resíduo plástico, este deverá possuir o ponto de fusão superior à temperatura de produção da mistura.
Húmida	<ul style="list-style-type: none"> - Confere maior controlo das propriedades do ligante modificado. - Vantagens económicas se proporcionar a substituição de percentagem de betume 	<ul style="list-style-type: none"> - Possibilita o uso de menor percentagem de resíduo (entre 2 a 8% da massa de betume); - Requer misturador suficientemente potente para obter-se uma mistura homogénea de ligante.

3 UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS NATURAIS, ARTIFICIAIS, RECICLADOS E DE RESÍDUOS

A norma EN 13043 de 2013 [9] classifica o material a agregar consoante a sua origem ou processamento em: **agregado natural** - “Agregado de origem mineral que foi sujeito apenas a processamento mecânico.”; **agregado artificial** - “Agregado de origem mineral resultante de um processo industrial compreendendo modificações térmicas ou outras.” e **agregado reciclado** - “Agregado resultante do processamento de materiais inorgânicos anteriormente utilizados na construção.” Já a Diretiva 2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho [10] estabelece um conjunto de definições e da qual se retira a de **resíduos**: “quaisquer substâncias ou objetos de que o detentor se desfaz ou tem intenção ou obrigação de se desfazer”. Podem, portanto, ser materiais de origem natural, artificial ou reciclado. **Resíduos de origem natural** são, por exemplo, os resíduos da exploração de pedreiras [11] ou os resíduos de extração mineira [12]. Por outro lado, **resíduos de origem artificial** são as areias de fundição [13], cinzas volantes [14], agregado siderúrgico [15][16] ou resíduos da indústria cerâmica [17]. Quanto aos **resíduos reciclados**, consideram-se os de borracha [18], e-waste [19], misturas betuminosas recuperadas [20], desperdícios plásticos [21], resíduos de construção e demolição [22] e os resíduos de vidro [23].

Existem disposições normativas que visam a adequada utilização de materiais não convencionais em substituição de materiais naturais em camadas de pavimentos rodoviários. De aplicação em Portugal, para além das Normas Europeias, existem os guias elaborados pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil registadas como Especificações LNEC, sendo as seguintes dedicadas à aplicação de resíduos, nomeadamente as RAs e os RCDs: LNEC E 472-2009 – Guia para a reciclagem de misturas betuminosas a quente em central [24]; LNEC E 473-2009 - Guia para a utilização de agregados reciclados em camadas não ligadas de pavimentos [25]; LNEC E 474-2009 - Guia para a utilização de materiais reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição em aterro e em camada de leito de infraestruturas de transporte [26]; LNEC E 484-2016 - Guia para a utilização de materiais provenientes de resíduos de construção e demolição em caminhos rurais e florestais [27]; LNEC E 485-2016 - Guia para a utilização de materiais provenientes de resíduos de construção e demolição em preenchimento de valas [28]. De notar que o único resíduo previsto como material constituinte na versão de 2014 do volume dedicado à Pavimentação do Caderno de Encargos Tipo Obra das Estradas de Portugal [29] nas misturas a quente são as RAs. Segundo o mesmo documento, a utilização de RCDs será possível apenas para camadas granulares não ligadas e aplicadas em camadas de base ou sub-base sendo a sua utilização condicionada à classificação por proporção dos agregados constituintes e em função do Tráfego Médio Diário de Pesados por Via (TMDp). O documento homólogo espanhol, o *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3)* [30], é mais permissivo relativamente à origem ou processamento do agregado. No artigo referente às Características Gerais do capítulo dedicado às misturas, é referida a possibilidade de utilização de agregados naturais ou artificiais combinados desde que cumpram as especificações reunidas no mesmo artigo. Relativamente às camadas granulares não ligadas, a diversidade de materiais possíveis é ainda maior: “*Para las categorías de tráfico pesado T2 a T4 se podrán utilizar materiales granulares reciclados, áridos reciclados de residuos de construcción y demolición — entendiendo por tales a aquellos resultantes del tratamiento de material inorgánico previamente utilizado en la construcción—, áridos siderúrgicos, subproductos y productos inertes de desecho.*”

3.1 Resíduos plásticos

Descrição e origem

Os polímeros artificiais, e entre eles os plásticos, podem ser classificados em dois grandes grupos de acordo com o seu comportamento quando aquecidos: os termoplásticos e os termofixos. Aqueles podem ser moldados com o calor, ao contrário dos termofixos [31]. Exemplos de termoplásticos são o polietileno, o polistireno, o polipropileno, o polivinil clorido ou o betume. Exemplos de termofixos são o poliéster, o poliuretano e a resina epóxi. Os resíduos plásticos produzidos pela sociedade são depositados nos pontos de recolha seletiva tais como os Ecopontos ou Ecocentros. São de formato e dimensão muito diverso e necessitam de ser sujeitos a uma pré triagem mais fina nas estações de tratamento, lavados e triturados sob a forma de partículas com dimensão desejada para poderem ser avaliados como agregado reciclado em misturas. A título de exemplo apresenta-se, na fotografia da Figura 2, um plástico já triturado que é um composto de polipropileno e polietileno de baixa densidade fornecido pela LIPOR I na Maia e cujo impacto estrutural será estudado numa mistura. À direita compara-se a curva granulométrica desse composto com a de um plástico simples PP. De realçar o andamento praticamente coincidente das curvas, fruto do modo de trituração e não do tipo de plástico cuja influência nesta propriedade é pouco significativa.

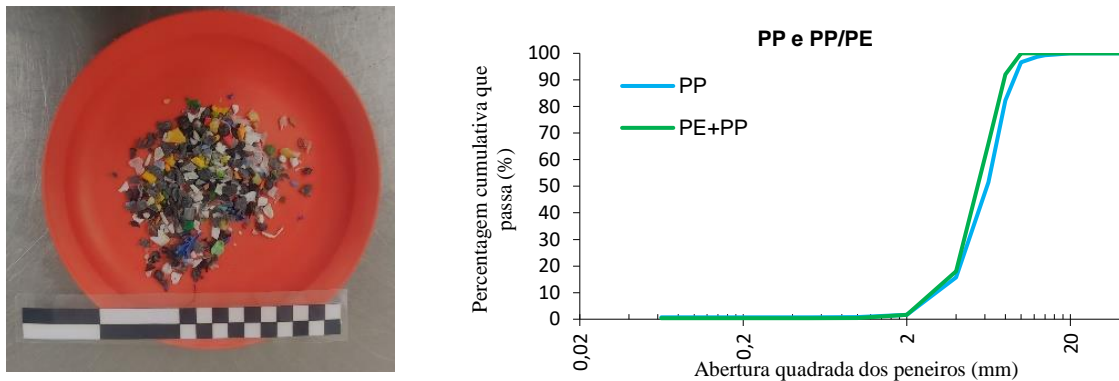


Figura 2 - Exemplo de plásticos triturados

3.1.1 Potencialidades

A literatura científica apresenta estudos que demonstram potencialidades estruturais e económicas de misturas com resíduos plásticos. A substituição parcial do agregado conduz a alguma redução dos custos sendo também encontradas referências à melhoria do desempenho associadas à flexibilidade da camada de desgaste [2]. No estudo laboratorial de Fonseca et al. [32] são comparados diferentes tipos de resíduos plásticos: acrinolina butadieno estireno (ABS), polietileno de alta densidade (HDPE e HDPE500) e polietileno de baixa densidade (LDPE) e observa-se que com 6% de ABS, HDPE e LDPE, a rigidez diminui, mas ainda assim, com valores aceitáveis para aplicação em camada de desgaste. Anwar et al. [33] ensaiam quantidades crescentes de PE e PET (5%, 10%, 15%, 20%) notando aumento da rigidez Marshall, especialmente com PE. Já Modarres et al. [34] utilizam 2% de PET em ensaios de tração indireta com provete cilíndricos (IT-CY) o que fez aumentar o módulo de rigidez. No trabalho de Zoorob et al. [35] substituindo 30% do agregado natural por LDPE sob a forma de pastilhas, consegue um aumento considerável (250%) da rigidez. No trabalho de Fonseca et al. [32], recorrendo a ensaios de compressão cíclica, apesar de algumas exceções de resultados, demonstra que na generalidade, um aumento de quantidade de plásticos, conduz a um aumento da **resistência à deformação permanente**. Vinayaka e Bheempal [36] verificam um máximo de **estabilidade** com 6% de PP. Em Fonseca et al. [32] recorre ao ensaio à flexão em quatro pontos com provetes prismáticos (4PB-PR) para a avaliação da **resistência à fadiga** em três níveis de extensão ($\epsilon_6 = 150\mu\text{m/m}$, $\epsilon_5 = 250\mu\text{m/m}$, $\epsilon_4 = 350\mu\text{m/m}$) e conclui que adicionando 6% de HDPE a mistura apresenta uma melhor performance à fadiga.

3.1.2 Limitações

Existem algumas desvantagens na adição de resíduos plásticos. A literatura revela preocupações ambientais e de saúde. Por exemplo, o processo de limpeza dos plásticos acarreta consumo de energia e produção de lixiviado [37]. Durante o processo de mistura e espalhamento as altas temperaturas podem libertar gases tóxicos [38]. O tráfego e os agentes climáticos provocam desgaste dos materiais constituintes da mistura incluindo os plásticos. O processo de lixiviação provocado pela passagem da água das chuvas vai contaminar os solos na proximidade [8]. Quando o polivinil clorido (PVC) é aquecido, são libertadas dibenzodioxinas policloradas e dibenzofuranos nos gases de exaustão. Estas dioxinas podem ser prejudiciais à saúde e, portanto, o PVC deve ser evitado [39].

3.2 Resíduos de construção e demolição (RCDs)

Descrição e origem

A composição dos RCDs não selecionados é muito variável e depende sobretudo da proveniência dos resíduos. Por exemplo, a madeira é geralmente o resíduo mais presente nas obras de construção enquanto o betão é o elemento mais comum nos resíduos de demolição [40]. Mas também podem incluir rocha, metal, cerâmica, amianto, tinta, óleo, alvenaria de tijolo, vidro, gesso cartonado, plástico [41]. Sendo que esta heterogeneidade é fator acrescido de imprevisibilidade no comportamento mecânico das misturas ao qual o RCD é misturado. A norma EN 933-11 (2011) [42] descreve o método de análise de agregados grossos reciclados para identificação e proporções relativas de cada constituinte. Após a remoção partículas flutuantes $FL(\%)$ os constituintes são separados em 6 grupos: $R_c(\%)$ - Betão, produtos de betão, argamassa, blocos de betão de alvenaria; $R_u(\%)$ -

Agregados não ligados, pedra natural, agregados tratados com ligantes hidráulicos; $R_b(\%)$ – Elementos cerâmicos de alvenaria (i. e. tijolos e telhas), blocos sílico-calcários de alvenaria, betão celular não flutuante; $R_a(\%)$ – Materiais betuminosos; $R_g(\%)$ – Vidro; $X(\%)$ – Outros: Materiais coesivos (i.e. argila e solo), diversos: metais (ferrosos e não ferrosos), madeira não flutuante, plástico e borracha, estuque. Propriedades tais como o de maior índice de achatamento, quantidade e qualidade dos finos, textura e angulosidade do agregado grosso, menor resistência à compressão, densidade e maior absorção de água conduzem a um menor desempenho em comparação com o agregado natural e explicam a sua exclusão como constituinte de uma mistura.

3.2.1 Potencialidades

Estudos sobre a aplicação de **RCD** em misturas revelam resultados contraditórios à cerca dos seus efeitos no **módulo de rigidez**. Esta divergência é, naturalmente, espectável dada a variabilidade de propriedades deste resíduo e que já anteriormente referida. Cupo-Pagano [43] observa uma diminuição ao passo que Pasandín [44] um aumento da rigidez Marshall. Aljassar [45] realiza ensaios “wheel tracking test” com resultados positivos quando se substitui totalmente agregado natural por RCD.

3.2.2 Limitações

A maior porosidade dos RCD, conduz geralmente a uma maior percentagem ótima de betume em comparação com as misturas contendo apenas agregado natural [46]. No entanto essa percentagem pode variar por depender da composição do RCD. Existem estudos que vão mais longe e recomendam, por razões económicas, a substituição de agregado por RCD na fração grossa apenas porque a fração fina do RCD apresenta maior percentagem de restos de argamassa e, logo, de superfície específica maior consumindo, por isso, mais betume.[47]. De recordar o facto de que maior percentagem de betume poderá significar maior sensibilidade da mistura à subida de temperatura. O mesmo estudo de Pasandín [44] apresenta a porosidade como responsável pela maior sensibilidade à água sobretudo com grandes percentagens de RCD. Essa elevada porosidade e menor densidade são razões para serem impedidos de ser utilizados nas camadas de desgaste. O estudo de Pérez [48] refere que alguns elementos de RCD, dada a sua geometria e aspereza e também pelo facto de apresentarem elevada acidez, contribuem para a fraca afinidade com o ligante, dificulta um correto envolvimento do betume durante produção da mistura em central.

3.3 Misturas betuminosas recuperadas (RAs)

Descrição e origem

As misturas existentes poderão ser reutilizadas como material constituinte de novas misturas se devidamente processadas, tamizadas e acondicionadas. Este resíduo particular de RCD denomina-se mistura betuminosa recuperada (MBR) ou RA (*Reclaimed Asphalt*) e é, basicamente, agregado revestido por betume envelhecido. Existem três origens possíveis para este material a reciclar: fresagem, placas retiradas de camadas de pavimentos posteriormente desagregadas e/ou britadas e materiais excedentários da produção de misturas. Já as técnicas para a sua reciclagem variam consoante o local de fabrico da mistura nova (*in situ* ou em central) e da temperatura (quente, semitemperada ou frio). Esta em função do ligante a utilizar (betume, emulsão, espuma de betume ou cimento) [24]. A norma 13108-8 de 2011 [49] especifica os requisitos para classificação e descrição das RAs. De aplicação em Portugal existe o guia LNEC E 472 [24] no qual se estabelecem recomendações para a sua utilização nas misturas a quente em central de forma a não comprometer o desempenho das misturas finais.

3.3.1 Potencialidades

As vantagens económicas com a aplicação de RAs são, porventura, as mais evidentes relativamente aos demais resíduos referidos. O guia LNEC E 472 refere que em algumas centrais betuminosa descontínuas, chega a ser possível incorporar 70% de RA [24]. Foram também encontradas vantagens sob o ponto de vista estrutural, por exemplo: Suresh [50], substituiu 20% de agregado natural por RA com impactos positivos na resistência à deformação permanente da mistura reciclada.

3.3.2 Limitações

As emissões de gases poluentes decorrente da técnica a quente [51] sobretudo quando há a presença de alcatrão nas misturas recuperadas, pode trazer consequências negativas para a saúde e para o ambiente. Por esta razão, se

a presença de alcatrão for detetada nas misturas em serviço, estas não deverão ser recicladas em misturas betuminosas a quente.

3.4 Resíduos de Borracha

Descrição e origem

A borracha SBR (*Styrene Butadiene Rubber*) é um dos aditivos ao betume comercializados mais conhecidos. Adiciona-se por via húmida, torna-o mais viscoso e confere à misturas maior flexibilidade e menor sensibilidade à temperatura [52]. Os resíduos de borracha sob a forma de grânulos ou em pó utilizados na tecnologia de pavimentação são obtidos a partir da trituração de pneus de veículos pesados ou ligeiros em final de vida e podem ser misturados quer por via seca ou por via húmida. O material que constitui um pneu é formado pela combinação de borracha natural e sintética com negro de fumo o que lhe confere a coloração preta e maior resistência.

3.4.1 Potencialidades

A literatura científica reporta, relativamente à borracha, resultados positivos sobre a **rigidez**. Hassan [53] experimenta 0%, 1,5% e 2,5% de partículas de borracha finas (<1,18mm) e grossas (>1,18mm e <3,35mm) e observa uma diminuição da rigidez ainda que com resultados semelhantes à mistura de controlo para altas temperaturas. Cao [54] com partículas de borracha entre 1 e 3mm com percentagens de 0%, 1%, 2%, 3% observa melhor resultados para a rigidez a altas e baixas temperaturas, sobretudo quando adicionado 3%. Para a **deformação permanente**, Hassan [53] observa melhor resistência à formação de rodeiras sobretudo com a adição de partículas finas, menor sensibilidade à temperatura da mistura modificada e melhor resultados no ensaio à abrasão. Cao [54] relata um aumento da resistência à deformação permanente a altas temperaturas e sobre a **fadiga** maior resistência ao aparecimento de fendas a baixas temperaturas. Cetin [55] testa grandes quantidades (10%, 15%, 20%) e os melhores resultados foram obtidos com 10% de borracha.

3.4.2 Limitações

Existem referências ao facto de o resíduo de borracha ter a capacidade de inchar ao absorver a fração leve do betume – os óleos aromáticos ou os maltenos. Este fenómeno ocorre quando adicionado por ambas as vias e podem triplicar o volume das partículas de borracha [56]. Sobre a borracha usada como aditivo ao betume, o Shell Bitumen Handbook [52], refere “dificuldades na dispersão no betume, requerendo altas temperaturas e tempos de digestão, caso contrário pode resultar num ligante heterogéneo

3.5 Agregado siderúrgico

Origem e descrição

O agregado siderúrgico é um resíduo já anteriormente identificado com sendo um agregado artificial dado que é um subproduto decorrente da fundição do aço. Resulta essencialmente de dois processos principais na produção: o de alto forno (BFS) e a de aciaria. A composição química e as propriedades geométricas e físicas destes materiais variam em função das matérias primas, do local onde são produzidos, do produto final pretendido e de tratamentos a dar a esses subprodutos [57][58][59]. Por exemplo, em Portugal as escórias provenientes de forno de arco eléctrico (EAF) em aciaria, após processamento, são comercializadas com o nome de ASIC (Agregado Siderúrgico Inerte para Construção).

3.5.1 Potencialidades

A literatura científica alguns indicadores muito positivos para aplicação em camada de desgaste: propriedades tais como a textura, angularidade, baixa presença de finos, alto equivalente de areia, baixo índice de achatamento e de achatamento, dureza, e resistência ao desgaste e polimento e afinidade ao betume [60]. No trabalho de Moura [61] são experimentadas grandes quantidades (acima de 50%) de agregado siderúrgico em misturas AC14 surf e AC 20 bin/base concluindo que, ao substituir 75% de resíduo, obtêm-se melhores resultados à deformação permanente do que na mistura de controlo, sem qualquer percentagem de resíduo.

3.5.2 Limitações

A elevada resistência à fragmentação implica que o processo de trituração das escórias em partículas de menor dimensão, seja extremamente dispendioso. As misturas com agregado siderúrgico tendem a apresentar maior volume de vazio no agregado mineral (VMA) causado pela maior angularidade das partículas. Esta propriedade conduz à necessidade de mais betume. A porosidade e o valor de absorção de água podem ser fonte de instabilidade volumétrica devido à reação química da água com o óxido de cálcio e de magnésio. Foram relatados problemas de lixiviação por libertação de metais pesados (cromo e vanádio) [57].

4. CONCLUSÃO

Os agregados naturais são recursos cuja extração e processamento com o objetivo de os aplicar em misturas betuminosas implica um consumo considerável de energia e à emissão de gases com efeitos negativos no ambiente. Enquanto isso, o consumo da sociedade produz uma grande diversidade de resíduos cujas características, está demonstrado, serem capazes de substituir parcialmente os agregados naturais e logo são merecedores de um posicionamento mais atento por parte dos intervenientes na indústria rodoviária. O trabalho de pesquisa bibliográfica já desenvolvido, encoraja a continuidade do estudo sobre esta temática por antever bons resultados sobretudo sob o ponto de vista estrutural.

O agregado siderúrgico é, aparentemente, o mais promissor dadas as suas características mecânicas, sendo eventualmente propenso para as vias com maior volume de tráfego pesado ou as da rede fundamental. Ao passo que, e num extremo oposto, as quantidades elevadas de produção de RCDs sobretudo em aglomerados populacionais, torna-os economicamente muito atrativos pela abundância e proximidade de vias urbanas, a construir ou reabilitar, ou nas de volume de tráfego reduzido.

A reciclagem de materiais para o bem da reciclagem apenas não é, seguramente, uma opção sustentável se não contribuir para a longevidade dos pavimentos e por isso, para que o desempenho estrutural e funcional não fique comprometido, as decisões devem ser fundamentadas tanto na economia como na técnica, e para isso é necessário aprofundar o trabalho laboratorial já desenvolvido.



6. REFERÊNCIAS

- [1] EAPA, “ASPHALT IN FIGURES 2020,” Brussels, 2021.
- [2] G. White and F. Hall, “Comparing Wet Mixed and Dry Mixed Binder Modification with Recycled Waste Plastic,” *RILEM Bookseries*, vol. 27, pp. 435–441, 2022, doi: 10.1007/978-3-030-46455-4_55.
- [3] L. Brasileiro, F. Moreno-Navarro, R. Tauste-Martínez, J. Matos, and M. del C. Rubio-Gámez, “Reclaimed polymers as asphalt binder modifiers for more sustainable roads: A review,” *Sustain.*, vol. 11, no. 3, pp. 1–20, Jan. 2019, doi: 10.3390/su11030646.
- [4] B. S. Rajput, S. P. Singh Rajawat, and G. Jain, “Characterization of waste plastic in flexible pavement,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1136, no. 1, p. 012055, 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1136/1/012055.
- [5] P. Rao and B. Mohammed, “Utilization of waste polymers for flexible pavement for low volume rural roads,” *Int. Res. J. Eng. Technol.*, 2020.
- [6] S. Rajasekaran, D. R. Vasudevan, and D. S. Paulraj, “Reuse of Waste Plastics Coated Aggregates-Bitumen Mix Composite For Road Application – Green Method,” 2013.
- [7] M. Sasidharan, M. Eskandari Torbaghan, and M. Burrow, “Using waste plastics in road construction,” no. 2016, pp. 1–18, 2019, [Online]. Available: <https://www.xe.com/>.
- [8] G. White and F. Hall, “Comparing asphalt modified with recycled plastic polymers to conventional polymer modified asphalt,” *Elev. Int. Conf. Bear. Capacit. Roads, Railw. Airfields, Vol. 1*, vol. 1, no. White 2019, pp. 3–17, Oct. 2021, doi: 10.1201/9781003222880-1.

- [9] CEN, “EN 13043:2013 - Aggregates for bituminous mixtures and surface treatments for roads, airfields and other trafficked areas.” European Committee for Standardization., Brussels, 2013.
- [10] European Commission and European Parliament, “EUR-Lex - 32008L0098 - EN - EUR-Lex,” *Official Journal of the European Union*. 2008, [Online]. Available: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:32008L0098>.
- [11] H. Akbulut and C. Gürer, “Use of aggregates produced from marble quarry waste in asphalt pavements,” *Build. Environ.*, vol. 42, no. 5, pp. 1921–1930, May 2007, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2006.03.012.
- [12] P. Calandra, S. Quaranta, B. Apolo Miranda Figueira, P. Caputo, M. Porto, and C. Oliviero Rossi, “Mining wastes to improve bitumen performances: An example of circular economy,” *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 614, pp. 277–287, May 2022, doi: 10.1016/J.JCIS.2022.01.106.
- [13] L. P. Nascimento, J. R. M. Oliveira, and C. Vilarinho, “Analysis of foundry sand for incorporation in asphalt mixtures,” *WASTES - Solut. Treat. Oppor. II - Sel. Pap. from 4th Ed. Int. Conf. Wastes Solut. Treat. Oppor. 2017*, pp. 443–449, 2017, doi: 10.1201/9781315206172-70.
- [14] U. Rongali, G. Singh, A. Chourasiya, and P. K. Jain, “Laboratory Investigation on Use of Fly Ash Plastic Waste Composite in Bituminous Concrete Mixtures,” *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 104, pp. 89–98, Dec. 2013, doi: 10.1016/J.SBSPRO.2013.11.101.
- [15] C. Maharaj, D. White, R. Maharaj, and C. Morin, “Re-use of steel slag as an aggregate to asphaltic road pavement surface,” <http://www.editorialmanager.com/cogenteng>, vol. 4, no. 1, p. 1416889, Jan. 2017, doi: 10.1080/23311916.2017.1416889.
- [16] E. Fortunato and A. G. Correia, “Comportamento estrutural de um trecho rodoviário construído com agregado siderúrgico inerte para construção (ASIC) STRUCTURAL BEHAVIOUR OF A ROAD SECTION BUILT WITH INERT STEEL,” no. May 2019, 2018.
- [17] R. Silvestre, E. Medel, A. García, and J. Navas, “Using ceramic wastes from tile industry as a partial substitute of natural aggregates in hot mix asphalt binder courses,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 45, pp. 115–122, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.03.058.
- [18] I. M. Khan, S. Kabir, M. A. Alhussain, and F. F. Almansoor, “Asphalt Design Using Recycled Plastic and Crumb-rubber Waste for Sustainable Pavement Construction,” *Procedia Eng.*, vol. 145, pp. 1557–1564, 2016, doi: 10.1016/J.PROENG.2016.04.196.
- [19] S. Dombe, A. B. Tapase, Y. M. Ghugal, B. A. Konnur, and P. Akshay, *Investigation on the Use of E-Waste and Waste Plastic in Road Construction*, no. January. Springer International Publishing, 2020.
- [20] G. Liu, M. van de Ven, and W. van den bergh, “Recycling of porous asphalt mixtures with PMB to increase sustainable use of non-renewable materials,” *Int. J. Pavement Res. Technol.*, vol. 6, no. 5, pp. 472–478, 2013, doi: 10.6135/ijprt.org.tw/2013.6(5).472.
- [21] L. D. Poulikakos *et al.*, “Harvesting the unexplored potential of European waste materials for road construction,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 116, pp. 32–44, 2017, doi: 10.1016/j.resconrec.2016.09.008.
- [22] A. R. Pasandín and I. Pérez, “Laboratory evaluation of hot-mix asphalt containing construction and demolition waste,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 43, pp. 497–505, Jun. 2013, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.02.052.
- [23] R. Abendeh, “Effect of Waste Glass on Properties of Asphalt Concrete Mixtures,” *Jordan J. Civ. Eng.*, vol. 11, Jan. 2017.
- [24] LNEC, “E 472 - 2009 GUIA PARA A RECICLAGEM DE MISTURAS BETUMINOSAS A QUENTE EM CENTRAL.” Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 2009.
- [25] LNEC, “E 473 - 2009 Guia para a utilização de agregados reciclados em camadas não ligadas de pavimentos.” Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 2009.
- [26] LNEC, “E 474 - 2009 Guia para a utilização de materiais reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição em aterro e camada de leito de infra-estruturas de transporte.” Laboratório

- Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 2009.
- [27] LNEC, “E 484 - 2016 Guia para a utilização de materiais provenientes de resíduos de construção e demolição em caminhos rurais e florestais.” Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 2016.
- [28] LNEC, “E 485 - 2016 Guia para a utilização de materiais provenientes de resíduos de construção e demolição em preenchimento de valas.” Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 2016.
- [29] Infraestruturas de Portugal., *Caderno de Encargos Tipo Obra, 14.03 - Pavimentação, Características dos materiais*. Portugal, 2014.
- [30] M. de F. Dirección General de Carreteras; Centro de Publicaciones, “Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes(PG-3) Orden FOM/2523/2014, de 12 de diciembre Parte 2 Materiales básicos. Parte 5 Firmes y Pavimentos. Parte 7 Señalización, balizamiento y sistema de contención de vehículos.” 2015.
- [31] J. R. Fried Prentice, “Polymer Science and Technology, 2nd Edition (Joel R. Fried),” *J. Chem. Educ.*, vol. 81, no. 6, p. 809, Jun. 2004, doi: 10.1021/ED081P809.
- [32] M. Fonseca, S. Capitão, A. Almeida, and L. Picado-Santos, “Influence of Plastic Waste on the Workability and Mechanical Behaviour of Asphalt Concrete,” *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 4, p. 2146, Feb. 2022, doi: 10.3390/APPI2042146.
- [33] M. K. Anwar, S. A. R. Shah, and H. Alhazmi, “Recycling and utilization of polymers for road construction projects: An application of the circular economy concept,” *Polymers (Basel)*., vol. 13, no. 8, pp. 1–11, 2021, doi: 10.3390/polym13081330.
- [34] A. Modarres and H. Hamed, “Effect of waste plastic bottles on the stiffness and fatigue properties of modified asphalt mixes,” *Mater. Des.*, vol. 61, pp. 8–15, 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2014.04.046.
- [35] S. E. Zoorob and L. B. Suparma, “Laboratory design and investigation of the properties of continuously graded Asphaltic concrete containing recycled plastics aggregate replacement (Plastiphalt),” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 22, no. 4, pp. 233–242, 2000, doi: 10.1016/S0958-9465(00)00026-3.
- [36] B. Vinayaka and S. N. Bheempal, “Use of Waste Plastic in Flexible Pavement Construction,” *SAMRIDDHI A J. Phys. Sci. Eng. Technol.*, vol. 11, no. SUP, pp. 206–211, Dec. 2019, doi: 10.18090/SAMRIDDHI.V11ISUP-1.17387.
- [37] M. Kayhanian, H. Li, J. T. Harvey, and X. Liang, “Application of permeable pavements in highways for stormwater runoff management and pollution prevention: California research experiences,” *Int. J. Transp. Sci. Technol.*, vol. 8, no. 4, pp. 358–372, 2019, doi: 10.1016/j.ijtst.2019.01.001.
- [38] X. Liu, Q. Cui, and C. Schwartz, “Greenhouse gas emissions of alternative pavement designs: Framework development and illustrative application,” *J. Environ. Manage.*, vol. 132, pp. 313–322, 2014, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2013.11.016.
- [39] R. De Sun, H. Irie, T. Nishikawa, A. Nakajima, T. Watanabe, and K. Hashimoto, “Suppressing effect of CaCO₃ on the dioxins emission from poly(vinyl chloride) (PVC) incineration,” *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 79, no. 2, pp. 253–256, 2003, doi: 10.1016/S0141-3910(02)00288-4.
- [40] B. Franklin Associates *et al.*, “CHARACTERIZATION OF BUILDING-RELATED CONSTRUCTION AND DEMOLITION DEBRIS IN THE UNITED STATES,” 1998.
- [41] F. Pacheco-Torgal, V. W. Y. Tam, J. A. Labrincha, Y. Ding, and J. De Brito, “Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste,” *undefined*, pp. 1–646, Sep. 2013, doi: 10.1533/9780857096906.
- [42] CEN, “EN 933-11:2009. Tests for geometrical properties of aggregates Part 11: Classification test for the constituents of coarse recycled aggregate,” no. 1. European Committee for Standardization., Brussels, 2009.
- [43] M. Cupo-Pagano, A. D’andrea, C. Giavarini, and C. Marro, “Use of building demolition waste for asphalt mixes: first results,” *Energy, Environ. Technol. Innov. Proc. III Int. Congr. Energy, Environ. Technol. Innov.*, pp. 203–208, 1994, Accessed: Feb. 23, 2022. [Online]. Available: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.515.4190&rep=rep1&type=pdf>.

- [44] A. R. Pasandín and I. Pérez, “Performance of hot-mix asphalt involving recycled concrete aggregates,” *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 21, no. 9, pp. 1044–1056, Jul. 2020, doi: 10.1080/10298436.2018.1518525.
- [45] A. H. Aljassar, K. B. Al-Fadala, and M. A. Ali, “Recycling building demolition waste in hot-mix asphalt concrete: A case study in Kuwait,” *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, vol. 7, no. 2, pp. 112–115, 2005, doi: 10.1007/s10163-005-0135-4.
- [46] A. R. Pasandín and I. Pérez, “Overview of bituminous mixtures made with recycled concrete aggregates,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 74, pp. 151–161, Jan. 2015, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.10.035.
- [47] S. Bhusal, X. Li, and H. Wen, “Evaluation of Effects of Recycled Concrete Aggregate on Volumetrics of Hot-Mix Asphalt,” *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res.*, vol. 2205, pp. 36–39, 2011, doi: 10.3141/2205-05.
- [48] I. Pérez Pérez, A. M. Rodríguez Pasandín, and J. Gallego, “Stripping in hot mix asphalt produced by aggregates from construction and demolition Waste,” *Waste Manag. Res.*, vol. 30, pp. 3–11, Jan. 2012, doi: 10.1177/0734242X10375747.
- [49] CEN, “EN 13108-8:2016 Bituminous mixtures - Material specifications - Part 8: Reclaimed asphalt.” European Committee for Standardization., Brussels, 2016.
- [50] B. Suresh, K. H. Mamatha, and S. V. Dinesh, “Utilization of rap in flexible pavements,” vol. 77, pp. 419–429, 2021, doi: 10.1007/978-981-15-5195-6_33.
- [51] A. Jullien, P. Monéron, G. Quaranta, and D. Gaillard, “Air emissions from pavement layers composed of varying rates of reclaimed asphalt,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 47, no. 4, pp. 356–374, Jul. 2006, doi: 10.1016/J.RESCONREC.2005.09.004.
- [52] R. N. Hunter, A. Self, and J. Read, *The Shell Bitumen Handbook*. ICE Publishing, 2015.
- [53] N. A. Hassan, G. D. Airey, and A. C. Collop, “Microstructural Characterisation of Rubber Modified Asphalt Mixtures,” Accessed: Mar. 30, 2022. [Online]. Available: www.nottingham.ac.uk/ntec.
- [54] W. Cao, “Study on properties of recycled tire rubber modified asphalt mixtures using dry process,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 21, no. 5, pp. 1011–1015, May 2007, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2006.02.004.
- [55] A. Cetin, “Effects of crumb rubber size and concentration on performance of porous asphalt mixtures,” *Int. J. Polym. Sci.*, vol. 2013, 2013, doi: 10.1155/2013/789612.
- [56] N. Abdul Hassan *et al.*, “Microstructural characterisation of dry mixed rubberised asphalt mixtures,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 82, pp. 173–183, May 2015, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.02.015.
- [57] M. Skaf, J. M. Manso, Á. Aragón, J. A. Fuente-Alonso, and V. Ortega-López, “EAF slag in asphalt mixes: A brief review of its possible re-use,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 120, pp. 176–185, May 2017, doi: 10.1016/J.RESCONREC.2016.12.009.
- [58] S. Barella, A. Gruttadauria, F. Magni, C. Mapelli, and D. Mombelli, “Survey about Safe and Reliable Use of EAF Slag,” *ISIJ Int.*, vol. 52, no. 12, pp. 2295–2302, 2012, doi: 10.2355/ISIJINTERNATIONAL.52.2295.
- [59] S. Caijun, “Steel Slag—Its Production, Processing, Characteristics, and Cementitious Properties,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 16, no. 3, pp. 230–236, Jun. 2004, doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:3(230).
- [60] M. Pasetto and N. Baldo, “Dissipated energy analysis of four-point bending test on asphalt concretes made with steel slag and RAP,” *Int. J. Pavement Res. Technol.*, vol. 10, no. 5, pp. 446–453, Sep. 2017, doi: 10.1016/J.IJPRT.2017.07.004.
- [61] C. Moura, L. Nascimento, C. Loureiro, M. Rodrigues, J. Oliveira, and H. Silva, “Viability of Using High Amounts of Steel Slag Aggregates to Improve the Circularity and Performance of Asphalt Mixtures,” *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 1, Jan. 2022, doi: 10.3390/APP12010490.