



## 26° Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 49ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv)

### O USO DO RECICLADO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO (RPA) NA ESTABILIZAÇÃO DE CAMADAS GEOTECNICAS DE PAVIMENTOS

*João Paulo Arruda Sewaybricker<sup>1</sup> & Caroline Dias Amancio de Lima<sup>1</sup>*

#### RESUMO

A pavimentação é um processo que consome consideráveis recursos naturais, gera resíduos significativos e amplifica as emissões de gases de efeito estufa. A inserção de Reciclado de Pavimento Asfáltico (RPA) nas camadas de base e sub-base surge como uma alternativa sustentável, com potencial para reduzir custos e diminuir a necessidade de novos materiais. No contexto brasileiro, apesar das iniciativas promovidas por órgãos como o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), ainda existe uma carência de referências quanto à utilização do RPA. Este, por sua vez, representa uma alternativa capaz de substituir agregados e aprimorar as propriedades, por meio do processo conhecido como estabilização granulométrica, sendo sua aplicação guiada por aspectos econômicos, logísticos e qualitativos da mistura. O desempenho adequado das estruturas de pavimentação está diretamente ligado à avaliação das propriedades mecânicas dos materiais constituintes, tais como a densidade, umidade ideal, Índice de Suporte Califórnia (ISC), permeabilidade, módulo de resiliência (MR) e deformação permanente (DP). O comportamento das misturas é influenciado pelo teor de RPA empregado, bem como pelas características mecânicas do próprio RPA e do solo ou agregado utilizados. Embora as pesquisas destaquem os benefícios da incorporação do RPA, existe uma demanda por padronizações técnicas mais sólidas e por dados adicionais no contexto brasileiro em relação à sua aplicação. Portanto, o presente artigo tem como objetivo contribuir ao abordar de forma resumida as informações referentes a normas nacionais, custos, melhores práticas, experiências internacionais e estudos correlatos acerca da utilização do RPA nas camadas subjacentes ao revestimento.

**PALAVRAS-CHAVE:** Pavimentação; Especificações de Serviços; Técnicas Construtivas; Propriedades Mecânicas.

#### ABSTRACT

Paving is a process that consumes significant natural resources, generates significant waste, and amplifies greenhouse gas emissions. The incorporation of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in the base and sub-base layers emerges as a sustainable alternative with the potential to reduce costs and decrease the need for new materials. In the Brazilian context, despite initiatives promoted by organizations such as the National Department of Infrastructure and Transport (DNIT), there is still a lack of references regarding the use of RAP. This, in turn, represents an alternative capable of replacing aggregates and enhancing properties through the process known as granulometric stabilization, with its application guided by economic, logistical, and qualitative aspects of the mixture. The proper performance of pavement structures is directly linked to the assessment of mechanical properties of constituent materials, such as density, optimum moisture content, California Bearing Ratio (CBR), permeability, resilient modulus (RM), and permanent deformation (PD). The behavior of mixtures is influenced by the RAP content employed, as well as the mechanical characteristics of RAP itself and the soil or aggregates used. Although research highlights the benefits of incorporating RAP, there is a demand for more robust technical standards and additional data in the Brazilian context regarding its application. Therefore, this article aims to contribute by summarizing information related to national standards, costs, best practices, international experiences, and related studies on the use of RAP in the layers beneath the pavement surface.

**KEY WORDS:** Paving; Standard Specifications; Road Construction Techniques; Mechanical Properties.

<sup>1</sup> Universidade Federal da Bahia, joosewaybricker@ufba.br; carolinedal@ufba.br.



## INTRODUÇÃO

A construção civil em geral demanda grandes volumes de insumos e energia (queima de combustíveis e energia elétrica) e geram grande volume de resíduos. A utilização de alternativas ao processo convencional pode reduzir o potencial de aquecimento global e de toxicidade do ar, solo e água. O Reciclado de Pavimento Asfáltico (RPA), também chamado Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), é o material produzido a partir da fresagem de pavimentos para manutenção, sendo composto por concreto asfáltico moído durante o processo de fresagem. O fresado tem características físicas comparáveis às características do concreto asfáltico original, onde a granulometria pode variar de acordo com o processo de fresagem e estocagem e o ligante envelhecido conforme idade do pavimento original (HOPPE *et al.*, 2015; WANG *et al.*, 2016 SAVIETTO, 2017).

A adição de RPA em misturas para bases e/ou sub-bases granulares, quando bem dimensionadas, incluem melhora na capacidade de suporte, boa drenagem e boa durabilidade. Porém, quando mal dimensionada ou não executada conforme dimensionado a adição pode causar um mau desempenho do pavimento e diminuir a capacidade de suporte da base granular (CHESNER *et al.*, 1998).

Nesse contexto, considerando a necessidade de dar uma destinação adequada ao material, entre outras vantagens inerentes ao seu reaproveitamento, este trabalho concentrou-se em realizar uma revisão abrangente do estado da arte, abordando não apenas o que tem sido estudado e os resultados obtidos, mas também fornecendo um resumo das questões relacionadas à produção (extração, transporte, técnicas de reciclagem) e aos custos envolvidos. Para isso, foram analisadas várias publicações de pesquisadores, associações de produtores e departamentos de transporte.

## INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES RODOVIÁRIO NO BRASIL

De acordo com os dados da Pesquisa da Confederação Nacional do Transporte (CNT) de Rodovias (CNT, 2022), o Brasil possui menos de um quarto de sua malha rodoviária pavimentada, predominantemente com pavimentos asfálticos. Além disso, é necessário realizar reconstruções, restaurações e manutenções em cerca de 100 mil quilômetros de rodovias, demandando um investimento estimado de aproximadamente R\$ 75 bilhões. Isso implica que não há apenas os custos de implantação, mas também os relacionados às intervenções necessárias. Quanto ao uso significativo de asfalto, é possível acessar informações sobre o mercado brasileiro por meio de um painel dinâmico disponibilizado pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP (ANP, 2023), conforme apresentado na Figura 1, que resume a quantidade total de cimentos asfálticos vendidos anualmente. O mercado de cimento asfáltico de petróleo continua a crescer, especialmente para aplicações em revestimento asfáltico. No entanto, já existem estudos na literatura brasileira e normativas nacionais que indicam a possibilidade de incorporação de RPA, o que, por sua vez, poderia levar a uma redução do consumo.

O DNIT, por meio da Resolução N°14/2021 (DNIT, 2021), estabelece que todos os projetos de restauração, adequação de capacidade e ampliação de obras viárias do próprio DNIT devem incluir o reaproveitamento de RPA, caso seja produzido no empreendimento. No Brasil, já existem diversos registros de obras que utilizaram RPA, como a recuperação da Rodovia Ayrton Senna (SP) em 2011, a restauração da Rodovia dos Imigrantes (SP) em 2012, a recuperação de trechos da Via



Dutra BR-116 em 2015 (SP) e a recuperação de trechos da Rodovia Fernão Dias BR-381 em 2020 e 2021 (RS, SP e MG), entre outras. Apesar disto, mesmo com os exemplos apresentados, ainda não existem dados disponíveis para consulta que indiquem a quantidade total de RPA utilizada em obras em todo o país.

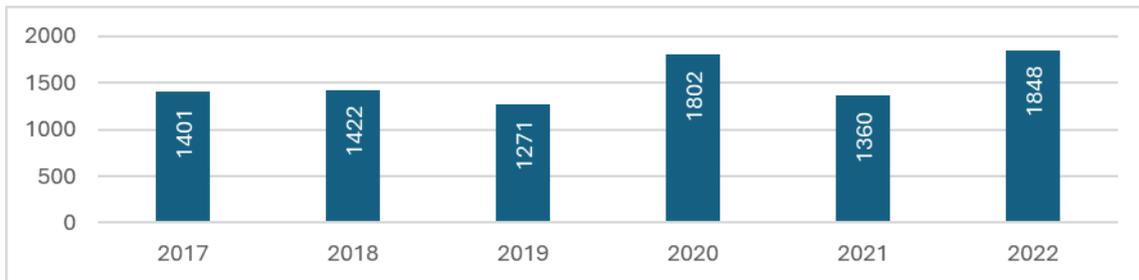


Figura 1. Quantidade total de CAP vendido anualmente no Brasil em milhares de toneladas (ANP, 2023)

Com relação às especificações de serviços com RPA, o próprio DNIT já publicou normas para reciclagem in situ com adição de espuma de asfalto (DNIT 166/2013-ES) e com adição de cimento Portland (DNIT 167/2013-ES), além de reciclagem em usina com adição de espuma de asfalto (DNIT 169/2014-ES). Adicionalmente, há a especificação de serviço referente ao concreto asfáltico reciclado em usina a quente (DNIT 033/2021-ES). O DER-SP também tem publicações para reciclagem in situ com adição de espuma de asfalto (ET-DE-P00/033), com emulsão (ET-DE-P00/034), com adição de cimento e brita (ET-DE-P00/035), com adição apenas de brita (ET-DE-P00/036) e para reciclagem em usina com adição de espuma de asfalto (ET-DE-P00/049). Inclusive o DER-PR tem publicações para reciclagem in situ com adição de espuma de asfalto (DER/PR ES-P 32/05), cimento Portland (DER/PR ES-P 33/05) e a partir de estabilização granulométrica (DER/PR ES-P 34/05). Apesar do esforço regulatório e técnico empreendido pelos órgãos competentes, há ainda necessidade de preenchimento de lacunas como com relação a dosagem. Outro fato importante, agora no contexto do modal aeroportuário, é que a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) ainda não disponibiliza publicações específicas referentes à reciclagem de pavimentos aeroportuários, demonstrando uma área que poderia ser alvo de futuras regulamentações e normativas para promover práticas sustentáveis e eficientes na gestão de pavimentos de aeroportos.

### Custos Associados às Obras de Pavimentação

Segundo Copeland *et al.* (2011), os custos associados à produção de asfalto podem ser divididos em quatro categorias principais: materiais, produção na planta, transporte e aplicação/construção. Entre essas categorias, os materiais representam a parcela mais significativa dos custos, correspondendo a cerca de 70% do custo total para a construção de pavimentos flexíveis. Além disso, ao planejar os custos de obras que envolvem a reciclagem de materiais, é fundamental considerar outros fatores, como a disponibilidade do material, a distância de transporte, o tipo de reciclagem empregado (in situ ou em usina) e a necessidade de estabilização química (com cal, cimento, emulsão, espumado), entre outros.

No contexto brasileiro, as referências de custos para obras de infraestrutura, como o SINAPI (Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil) e o SICRO (Sistema de Custos Referenciais de Obras), indicam que os insumos representam mais de 90% dos custos



diretos em obras de pavimentação. A Tabela 1 foi elaborada com o objetivo de destacar de maneira clara a redução dos custos diretos associados à reciclagem do material fresado em projetos de pavimentação, permitindo observar a diminuição do custo total, principalmente devido à economia nos insumos.

Tabela 1. Custos para execução de camadas de pavimentos com e sem reciclagem de material fresado

Tipo de Custo	SICRO (ref. Bahia 2023/01)			
	Base de Brita Graduada	Reciclagem <i>in situ</i>	CBUQ faixa "C"	Reciclagem em Usina
Código	4011276	4011484	4011463	4011478
Custo Unitário	R\$ 163,40	R\$ 68,95	R\$ 206,73	R\$ 173,78
Unidade	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	t	t
Equipamentos	3,30%	40,05%	3,90%	4,87%
Mão de Obra	0,08%	1,98%	0,76%	0,95%
Transporte	3,35%	1,37%	3,62%	4,51%
Insumos	93,27%	56,60%	91,72%	89,67%

## EXPERIÊNCIA AMERICANA COM O USO DO RPA

A *Federal Highway Administration* (FHWA, 1981) divulgou o projeto de reciclagem a frio de pavimentos executado em Tamworth, NH, USA. Desde então, a própria FHWA, os Departamentos Estaduais de Transportes e a *Asphalt Recycling and Reclaiming Association* (ARRA) desenvolveram e publicaram diversas normas, projetos e manuais com boas práticas para reciclagem de RPA. Fora do modal rodoviário, a *Federal Airport Administration* (FAA) apresenta requisitos para utilização do RPA em aeroportos através da circular orientativa AC- 150/5370-10H - *Standard Specifications for Construction of Airports*.

De acordo com uma pesquisa publicada pela *National Asphalt Pavement Association* (NAPA, 2022), em 2021 os Estados Unidos produziram um total de 137,5 milhões de toneladas de RPA (Reciclado de Pavimento Asfáltico). Desse montante, 101,3 milhões de toneladas foram estocadas, enquanto 99,1 milhões de toneladas foram recicladas. Esse número representa um aumento significativo de 68,9% em relação a 2009, quando a pesquisa teve início. Conforme apresentado na Figura 2, do total de asfalto reciclado em 2021, mais de 95% do material foi utilizado na produção de misturas asfálticas para a construção de novos pavimentos, enquanto apenas 4% foram empregados como agregados. O uso do RPA possibilitou uma redução no consumo de ligante asfáltico de aproximadamente 4,7 milhões de toneladas e de agregados virgens em cerca de 90 milhões de toneladas, resultando em uma economia estimada de mais de US\$ 3,4 bilhões em insumos. Além dos benefícios financeiros, o uso do RPA também teve um impacto positivo na redução das emissões de gases de efeito estufa (GEEs), diminuindo as emissões em 2,6 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>e. As quantidades de emissões evitadas estão apresentadas na Figura 2, equivalendo ao total anual de emissões de mais de 570.000 veículos de passeio. Esses números refletem o potencial e os benefícios ambientais e econômicos associados à utilização eficaz do RPA na indústria de pavimentação asfáltica nos Estados Unidos.

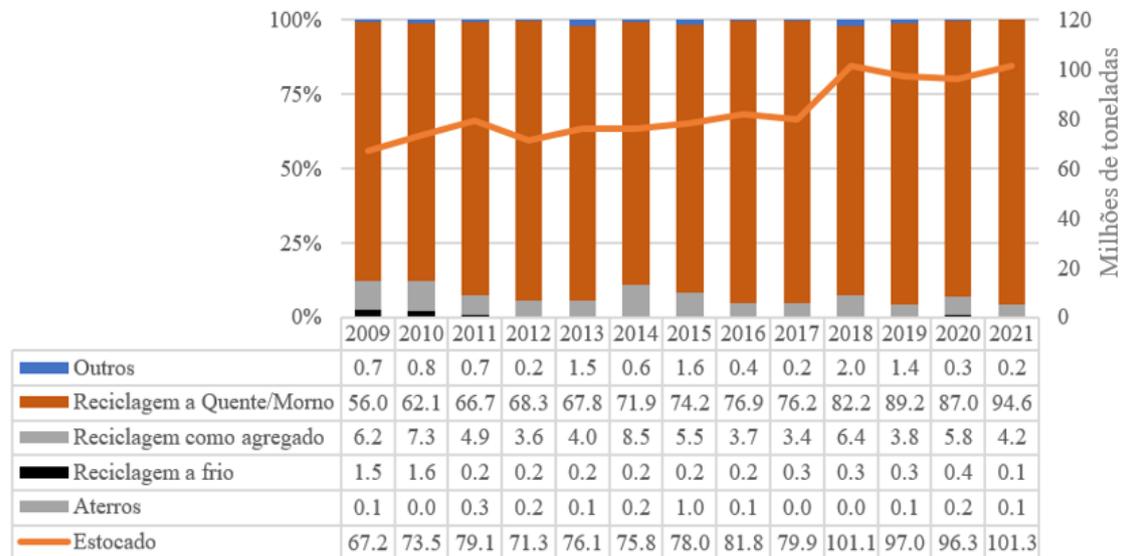


Figura 2. Comparação entre total de RPA estocado e sua destinação em milhões de toneladas (adaptado de NÁPA, 2022)

## A RECICLAGEM DE PAVIMENTOS

A gestão adequada do RPA é essencial para garantir a qualidade e o desempenho das misturas, sejam elas granulares ou asfálticas, que incorporam esse material. Essa gestão abrange diversos cuidados, desde a obtenção do material fresado. É possível ressaltar os seguintes aspectos para garantir uma gestão eficaz do RPA: a técnica adequada aplicada, a preservação da pureza (proteção contra contaminações), o destorroamento, a proteção contra a umidade, a caracterização por meio de ensaios, a classificação e a separação/fracionamento/granulometria.

### Extração e Transporte do Material

O RPA é obtido por meio da técnica de fresagem a frio, que consiste no desgaste do pavimento por meio abrasivo. Durante o processo, parte dos agregados presentes no pavimento é quebrada, resultando em uma alteração na curva granulométrica do material que estava originalmente na pista. O material obtido a partir da fresagem não possui as mesmas características que tinha quando foi originalmente aplicado na pavimentação. O RPA fresado geralmente forma aglomerados com uma granulometria mais grosseira do que o material original. Após a extração do betume (ligante asfáltico) do RPA, também é possível observar uma curva granulométrica mais fina devido à quebra dos agregados durante o processo de fresagem, conforme descrito por Bonfim (2010 e 2021).

Desde a fresagem, transporte até a estocagem o material deverá ser mantido livre de contaminações, destorroado para reduzir a existência de grumos e protegido contra umidade. O material deverá ser ensaiado e caracterizado conforme sua granulometria e a quantidade de ligante (DNIT, 2014 e 2021). O RPA produzido deve ser classificado e separado em pilhas homogêneas para permitir maior controle da mistura a ser realizada. O fracionamento do material fresado em tamanhos diferentes de partículas permite maior flexibilidade para a dosagem. As frações mais grossas do material geralmente possuem menos asfalto incorporado do que as mais finas, isto ocorre devido ao agregado fino possuir proporcionalmente ao seu volume uma área maior revestida pelo ligante (FHWA, 2018). Estudos como o conduzido por Lee *et al.* (2012) são valiosos para entender as diferenças entre frações grossas e finas de RPA. Essas



diferenças podem afetar a dosagem e o desempenho das misturas asfálticas recicladas com alto teor de RPA. Esses pesquisadores observaram uma diferença de pelo menos 2% entre frações grossas e finas para misturas asfálticas com alto teor de RPA.

### Técnicas para Reciclagem de Pavimentos

A reciclagem a frio *in situ* é realizada a partir de recicladoras, como a liustrada na Figura 3a. Essas máquinas têm a capacidade de fresar o asfalto existente, tornando-o granular, além de aplicar com precisão o agente ligante e a água, realizando a mistura necessária. Durante o processo, também é viável introduzir aditivos: cimento, água, emulsão betuminosa e espuma de asfalto. A reciclagem a frio *in situ* possibilita a reutilização do RPA em camadas de sub-base e base. O processo para solo/agregado-RPA e misturas asfálticas estão descritos a seguir.

O processo de estabilização granulométrica envolve a combinação de solo/agregado e RPA para aplicação em camada de base ou sub-base de pavimento e segue comumente os seguintes passos: preparação do material geotécnico (solo e/ou agregado); segregação do RPA por tamanho; dosagem; mistura (de forma homogênea) em equipamento adequado, como um misturador de solo ou uma recicladora, podendo, se necessário, adicionar água ou outros aditivos para garantir a coesão da mistura; compactação realizada com equipamentos de compactação, como rolos compactadores, de acordo com as especificações do projeto.

A reciclagem a frio em usina é realizada após a obtenção do RPA por meio da fresagem a frio do pavimento asfáltico. O material fresado é transportado para um local onde é armazenado e posteriormente classificado e segregado. As usinas de mistura a frio podem ser fixas ou móveis e são mais simples em comparação com as usinas de mistura a quente, pois não requerem o processo de secagem e aquecimento dos materiais. Pode-se também utilizar uma usina de pré-misturado a frio, como a da fabricante BOMAG MARINI ilustrada na Figura 3b. A principal vantagem desse processo em relação à reciclagem *in situ* é o maior controle tecnológico no processo de mistura. No entanto, é importante considerar o custo adicional de transporte ao levar o material fresado para a usina, um fator que não está presente na reciclagem *in situ*. Portanto, o custo adicional de transporte deve ser avaliado durante o planejamento do projeto, e é recomendável que a usina esteja localizada o mais próximo possível dos locais de produção do RPA e aplicação do material reciclado. (CUNHA, 2010; MARINI, 2018; BONFIM, 2021).

A reciclagem de RPA misturado a quente pode ser realizada em usinas do tipo gravimétrica ou volumétrica. Usinas gravimétricas usualmente são de maior porte e menor capacidade de mobilização quando comparadas às usinas volumétricas que podem ser inclusive do tipo móvel como a usina da Figura 3c. O processo para reciclagem em usinas volumétricas também exige peneiramento e segregação prévia do RPA para início do processo de mistura. Esse tipo de usina não contempla jogo de peneiras no seu processo. O RPA e os agregados virgens são inseridos nos silos dosadores. Na sequência, o tambor secador recebe o RPA, agregados virgens o ligante asfáltico e realiza a mistura. Após a mistura, a massa asfáltica passa pelo elevador para ser descarregada nos caminhões para transporte. A utilização de usinas do tipo gravimétrica, apesar de dificultar questões como mobilização, permite maior controle tecnológico quando comparado com as usinas móveis. Nesse tipo de usina, tanto agregados quanto RPA após passarem pelos secadores e já aquecidos, passam por uma série de peneiras para separação por granulometria. Então são depositados em silos quentes até que sejam transportados



para o misturador. Durante a homogeneização do material são adicionados o ligante asfáltico e o agente rejuvenescedor. Após esse processo, a mistura está pronta para carregamento nos caminhões e transporte (CUNHA, 2010; MARINI, 2018; BONFIM, 2021).



Figura 3. Reciclagem com RPA: (a) - Tratamento de materiais na reciclagem a frio, (b) Usina móvel do tipo MARINI 600 US para mistura a frio, (c) Usina móvel para misturas a quente; volumétrica. (MARINI, 2018 e WIRTGEN, 2020)

Comparada à reciclagem a quente, a reciclagem a frio oferece benefícios ambientais significativos. Ela permite a redução tanto das emissões de carbono quanto do consumo de energia devido às baixas temperaturas de construção (DAY *et al.*, 2019). Salienta-se que usinas comuns para misturas asfálticas a quente podem ser adaptadas para incorporar RPA, desde que sejam devidamente modificadas para essa finalidade.

## ESTUDOS REALIZADOS COM RPA PARA ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA

Com base nas normativas e em pesquisas recentes realizadas no Brasil, como as de Santos *et al.* (2018) e Araújo Jr (2019), entre outras mencionadas aqui, foi possível compilar os ensaios a serem conduzidos para avaliar os materiais constituintes básicos em uma mistura solo-RPA. Para os componentes do solo, bem como a mistura, os ensaios incluem granulometria, massa específica, curva de compactação (com medições de massa específica aparente seca – MEAS - e umidade ótima -  $W_{ót}$ ), Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR) com análise de expansão, expansibilidade, contração, limites de consistência, módulo de resiliência (MR) e deformação permanente (DP). Para o RPA em si, os ensaios específicos compreendem a análise da granulometria, massa específica, teor de asfalto e o ensaio Rice. Alguns estudos estão detalhados a seguir, fornecendo uma compreensão abrangente dos efeitos da adição de RPA ou mesmo cimento em diferentes tipos de solos e agregados.

### Misturas Solo-RPA

Hasan *et al.* (2018) investigaram a relação entre RPA e umidade no MR de subleitos misturados com RPA-solo no Novo México, EUA. As amostras foram extraídas da mesma rodovia e classificadas como A-2-6 pela AASHTO. A pesquisa utilizou várias misturas com teores de RPA variando de 0 a 75%. Observou-se um aumento no MR com o aumento do teor de RPA, especialmente próximo à umidade ótima da mistura.

Mustapha *et al.* (2014) usaram RPA para estabilizar um solo laterítico, classificado como argila A-6 pela AASHTO. As misturas variaram em teores de RPA de 5% e foram compactadas usando energia British Standard Heavy (BSH). Além da compactação, outros testes como CBR e resistência à compressão não confinada foram realizados, destacando uma amostra de mistura RPA-solo (60%-40%) com a maior massa específica seca.



Mousa e Mousa (2017) estudaram as propriedades mecânicas de misturas RPA-solo, usando um solo classificado como areia (A-1-B) pela AASHTO. Foram feitas amostras de controle de RPA (100%) e areia (100%), além de 9 misturas areia-RPA com variações de 10% entre elas. Cada amostra passou por um ensaio de compactação Proctor e um teste de Índice de Suporte Califórnia. Os principais resultados desses estudos, e outros, estão compilados na Tabela 2.

Tabela 2. Pesquisas sobre misturas RPA-Solo e propriedades mecânicas testadas

Ano	Auto	Classific. HRB	MEAS	$W_{ót}$	CBR	UCS	MR
2014	Akinwumi	A-2-6	Menor	Menor	Maior	Menor	N/D
2014	Mustapha <i>et al.</i>	A-6	Maior	Menor	Maior	Maior	N/D
2017	Mousa e Mousa	A-1-B	Maior	Menor	Maior	N/D	N/D
2018	Hasan <i>et al.</i>	A-4	N/D	N/D	N/D	N/D	Maior
2020	Ogunrinde <i>et al.</i>	A-6	Maior	Menor	Maior	N/D	N/D

\* MEAS: Massa Específica Aparente Seca Máxima,  $W_{ót}$ :umidade ótima, CBR: Índice de Suporte Califórnia – ISC, UCS: Compressão não confinada. MR: Módulo de Resiliência

É possível observar que a umidade ótima é menor e o CBR é maior em todas as situações, com o acréscimo considerado ideal do RPA. Além disso, apenas uma pesquisa registrou menor massa específica aparente seca na mistura com RPA incorporado. Na pesquisa que foi executado MR, esse apresentou melhoria no comportamento mecânico.

### Misturas RPA-AV e RPA-AR

Vários estudos já foram publicados a partir de testes das propriedades mecânicas de misturas feitas com RPA e agregados virgens (RPA-AV) e RPA com agregados reciclados (RPA-AR) para bases granulares. O objetivo em geral de misturas RPA-AV e RPA-AR é de redução de custos e impactos ambientais causados pela extração e transporte dos agregados virgens até sua aplicação.

Ullah e Tanyu (2019) estudaram misturas RPA-AV buscando diretrizes para bases granulares. Após coletar amostras de RPA de 14 locais e avaliar o teor de ligante, selecionaram 4 para mistura com agregados virgens. Essas misturas foram compactadas usando o método ASTM D7382 e avaliadas quanto ao MR, DP e CBR. O MR das misturas RPA-AV superou o das 100% VA. A adição de RPA aumentou deformações, porém, com teores mais baixos de RPA, o desempenho foi superior ao de 100% de agregados virgens.

Por sua vez, Arshad e Ahmed (2017) analisaram misturas com agregados virgens, RPA e RCA (Recycled Concrete Aggregate). Foram feitas combinações com RPA-AV e RPA-RCA, e submetidas a testes para determinar o MR. O RPA tendeu a aumentar as deformações, mas o MR foi mais alto comparado ao RCA e AV, atribuído à resistência do ligante asfáltico à deformação.

Sultan *et al.* (2013) estudaram o RPA no Iraque, visando melhorar suas propriedades mecânicas. Os testes mostraram que o RPA não cumpria os padrões locais. Ao misturar com agregados virgens, o CBR diminuiu com o aumento do teor de RPA, mas as misturas com baixo teor de RPA (até 60%) mostraram um CBR aceitável para sub-bases.

Já Bennert e Maher (2005) examinaram como a granulometria influencia o desempenho de bases. Avaliaram misturas com agregados virgens, RCA e RPA em diversos testes. Concluíram que a mistura



RPA-AV deve ter no máximo 50% de RPA, pois valores superiores reduzem o CBR e a permeabilidade em comparação ao agregado virgem. Mais detalhes desses estudos e outros estão na Tabela 3.

Tabela 3. Pesquisas sobre misturas RPA-AV e propriedades mecânicas testadas

Ano	Autor	MEAS	$W_{ót}$	Permeabilidade	CBR	MR	DP
1999	Taha et al.	Menor	Sem Alteração	Maior	Menor	N/D	N/D
1999	MacGregor et al.	N/D	N/D	Sem Alterações	N/D	Maior	Maior
2005	Bennert e Maher	Menor	Menor	Menor	N/D	Maior	Maior
2005	Mokwa e Peebles	Menor	Menor	Maior	N/D	N/D	N/D
2013	Sultan et al.	Menor	Menor	N/D	Menor	N/D	N/D
2017	Seferoglu et al	Menor	Menor	Menor	Menor	N/D	N/D

\* MEAS: Massa Específica Aparente Seca Máxima,  $W_{ót}$ : umidade ótima, CBR: Índice de Suporte Califórnia – ISC, MR: Módulo de Resiliência, DP: Deformação Permanente

As pesquisas disponíveis sobre desempenho de misturas RPA-AV ou RPA-AR não apresentaram melhora nas propriedades mecânicas quando comparadas à bases de agregados virgens. Nesse caso o único parâmetro que aparenta melhora é o MR, entretanto MEAS,  $W_{ót}$ , CBR e DP apresentam piora. Portanto, o teor de RPA incorporado deve ser limitado de forma a preservar o desempenho do pavimento e não encurtar sua vida útil.

### Misturas com Aditivo Químico

Yuan *et al.* (2010) conduziram um estudo para o Texas DoT, avaliando misturas de RPA e agregados, tratadas com cimento Portland (CP) para aplicações em camadas de base. Foram testadas misturas com diferentes teores de RPA (100%, 75% e 50%) e diferentes quantidades de cimento (0%, 2%, 4% e 6%) em laboratório. Inicialmente, antes da adição de cimento, as misturas apresentaram menor umidade ótima e massa específica seca máxima à medida que o teor de RPA aumentava. Após a adição de cimento, houve um aumento na massa específica seca máxima, umidade ótima e resistência à compressão não confinada dos corpos de prova moldados com 7 dias de cura. Os teores ideais de cimento foram de 4%, 3% e 2% para as misturas com 100%, 75% e 50% de RPA, e observou-se que o teor de betume nas amostras de RPA não teve influência nos resultados dos ensaios.

Khay *et al.* (2014) realizou um estudo experimental de laboratório com misturas RPA-AV e teores de 0%, 25%, 50%, 75% e 100% de RPA. O CP foi adicionado para estabilizar as misturas, com uma proporção de 6% do peso total. As amostras foram compactadas usando o método Proctor Modificado, e os ensaios de resistência à compressão, resistência à flexão, resistência à tração indireta e módulo de elasticidade foram realizados após 7, 14 e 28 dias de cura, de acordo com os procedimentos normativos aplicáveis. Os resultados demonstraram que um aumento no teor de RPA levou a uma redução na resistência à compressão, resistência à flexão, resistência à tração indireta e módulo de elasticidade. No entanto, para teores de RPA de até 60%, ainda foi possível obter propriedades mecânicas aceitáveis para utilização como camada de base.

Saeed *et al.* (2022) investigaram a influência da adição de materiais reciclados (RPA e CKD) para reforço de solos coesivos. Utilizaram um solo siltoso de alta plasticidade (MH) conforme a classificação do Sistema de Classificação Unificada dos Solos (USCS). Inicialmente, estabilizaram amostras do solo com diferentes teores de CKD (5%, 10%, 15% e 20%) e as compactaram seguindo o método Proctor



Modificado, observando que maiores teores de CKD resultaram em umidade ótima menor e massa específica aparente seca maior. Os pesquisadores conduziram ensaios de resistência à compressão não confinada em amostras com diferentes idades de cura (7, 14 e 28 dias) após a estabilização com CKD. Os resultados indicaram um teor ótimo de CKD de 20%. Em seguida, realizaram misturas do solo com 20% de CKD e diferentes teores de RPA (0%, 15%, 25% e 35%). Conforme o teor de RPA aumentava, a MEAS aumentava e a  $W_{ót}$  diminuía. Além disso, observaram um aumento na resistência à compressão não confinada das amostras com o aumento do teor de RPA até o teor ótimo de 25% para todas as idades dos corpos de prova ensaiados.

Lima (2020) analisou o impacto da adição de cimento Portland (CP) e RPA na estabilização de solo argiloso classificado como silte argiloso (A-7-6) de acordo com a AASHTO. Foram preparadas misturas com diferentes teores de RPA (0%, 20%, 40%, 50%, 60% e 80%) com e sem adição de CP (3%). Essas misturas foram compactadas seguindo o método Proctor Intermediário e submetidas a ensaios de RCS e RTCD. Os resultados mostraram que à medida que o teor de RPA aumentava nas misturas, houve um aumento na MEAS e uma redução na  $W_{ót}$ , tanto para misturas estabilizadas com CP quanto para misturas sem cimento. Em relação à resistência à compressão simples, os corpos de prova apresentaram valores superiores à medida que o RPA era adicionado até o teor ótimo de 60% de RPA, independentemente da idade de cura (7, 14 e 28 dias). Os resultados do ensaio RTCD seguiram a mesma tendência da RCS, com valores aumentando à medida que o teor de RPA aumentava, até o teor ótimo de 60% de RPA, tanto com CP quanto sem cimento, para todas as idades de ensaio. Além disso, os resultados de expansão e CBR também mostraram melhorias à medida que o teor de RPA aumentava, chegando a 80% de RPA. De acordo com o manual de pavimentação do DNIT (2006), as amostras sem cimento foram consideradas adequadas para uso como subleito e reforço de subleito, enquanto as amostras com cimento foram consideradas adequadas para uso como camada de sub-base a partir da adição de 40% de RPA.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos apresentados destacam que vários fatores, incluindo o teor de RPA incorporado, a origem do agregado utilizado e a granulometria do RPA, têm um impacto significativo no desempenho das misturas. Em muitos casos, observou-se uma melhoria nas propriedades dos materiais, incluindo o parâmetro MR. Isso é significativo quando se lida com solos que não atendem inicialmente aos requisitos de capacidade de suporte de acordo com as especificações. É importante notar que as variações nas propriedades estão relacionadas às proporções de RPA na mistura, e atualmente não existem procedimentos padronizados no Brasil para a dosagem de misturas envolvendo material granular e RPA, seja solo-RPA ou brita-RPA, para aplicação em camadas de base ou sub-base. Além disso, não há especificações claras relacionadas às granulometrias necessárias para uma estabilização adequada com o RPA.

O uso de RPA em camadas abaixo do revestimento do pavimento deve ser dimensionado com base nas propriedades mecânicas necessárias para atender aos regulamentos locais. Ensaio específicos foram mencionados para analisar os materiais puros e em mistura geotécnica a fim de garantir um bom desempenho e durabilidade do pavimento.

Logo, o RPA já pode ser considerado um material valioso e de qualidade que pode substituir agregados e alguns ligantes em determinadas aplicações. O uso de RPA é motivado principalmente pelos custos de materiais virgens e transporte. A decisão de usar RPA deve levar em conta fatores econômicos, disponibilidade de materiais, localização da planta de produção, capacidade de produção e



compatibilidade com outros materiais. Além dos custos diretos mencionados anteriormente, a possível melhoria das propriedades mecânicas dos materiais usados nas camadas de base e sub-base pode resultar na redução da espessura das camadas subsequentes do pavimento, levando a economias financeiras.

Por fim, verificou-se que existem poucos dados nacionais disponíveis sobre a produção e utilização de material fresado na restauração ou construção de novos pavimentos. A coleta desses dados é de extrema importância para avaliar o verdadeiro potencial do impacto da reciclagem de pavimentos na infraestrutura nacional. Com a implementação adequada e a coleta de dados para avaliar seu desempenho, o uso do RPA pode se tornar ainda mais difundido no Brasil e em outros países, promovendo práticas mais sustentáveis na indústria de pavimentação e contribuindo para a preservação do meio ambiente. Foi observada também uma lacuna de normativas específicas para a aplicação de RPA na infraestrutura aeroportuária.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS. **Painel Dinâmico do Mercado Brasileiro de Asfaltos**. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br>. Acesso em 08 set. 2023.
- AKINWUMI, I. I. Plasticity, strength and permeability of reclaimed asphalt pavement and lateritic soil blends. **International journal of scientific and engineering research**, v. 5, n. 6, p. 631-636, 2014.
- ARAÚJO Jr, L. P. V. Estudo sobre estabilização de solo com material fresado de pavimentação asfáltica. Dissertação de mestrado. UFSCar. São Carlos, 2019.
- ARSHAD, M.; AHMED, M.F.. Potential use of reclaimed asphalt pavement and recycled concrete aggregate in base/subbase layers of flexible pavements. **Construction and Building Materials**, v. 151, p. 83-97, 2017.
- BENNERT, T. e A. M. **The development of a performance specification for granular base and subbase material**. Report No. FHWA-NJ-2005-003. New Jersey Department of Transportation, Trenton, 2005.
- BONFIM, V. **Fresagem de pavimentos asfálticos**. 3ª ed., São Paulo, 2010.
- BONFIM, V. **Pavimento sustentável**. Exceção Editorial: São Paulo, 2021.
- BRETT, A. W.; WILLIS, J. R. e SHACAT, J. **Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage**. National Asphalt Pavement Association, Greenbelt, MD, EUA, 2022.
- CHESNER, W. H. et al. **User guidelines for waste and by-product materials in pavement construction**. Recycled Materials Resource Center, 2002.
- CNT. de Rodovias 2022: Relatório Gerencial. Brasília. **Pesquisa CNT de Rodovias**, 2022.
- COPELAND, A. et al. **Reclaimed asphalt pavement in asphalt mixtures: State of the practice**. McLean: US. Department of Transportation - Federal Highway Administration, 2011.
- CUNHA, C. M. **Reciclagem de pavimentos rodoviários flexíveis: diferentes tipos de reciclagem**. 2010. Tese de Doutorado.
- DAY, D., et. al. Emulsion cold mix asphalt in the UK: A decade of site and laboratory experience. **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)**, 2019.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 159-ES: Pavimentos asfálticos – Fresagem a frio – Especificação de serviço**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR, Rio de Janeiro, 2011.
- \_\_\_\_\_. **DNIT 033-ES: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico reciclado em usina a quente – Especificação de serviço**. Instituto de Pesquisas em Transportes – IPR, Rio de Janeiro, 2021.
- \_\_\_\_\_. **DNIT 169-ES: Pavimentação - Reciclagem de pavimento em usina com espuma de asfalto - Especificação de Serviço**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR, Rio de Janeiro, 2014.
- \_\_\_\_\_. **DNIT Sistema de custos referenciais de obras – SICRO**. Disponível em <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos>. Acesso em 24 jun. 2023.



FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Demonstration Project 39 – Asphalt Recycling Tamworth Cold Recycling Project**, 1981.

\_\_\_\_\_. **FHA. State of the Knowledge for the Use of Asphalt Mixtures with Reclaimed Binder Content**, Washington, EUA, 2018.

HASAN, M.M.; ISLAM, M.R.; TAREFDER, R. A. Characterization of subgrade soil mixed with recycled asphalt pavement. **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)**, v. 5, n. 3, p. 207-214, 2018.

HOPPE, E. J. et al. **Feasibility of reclaimed asphalt pavement (RAP) use as road base and subbase material**. Charlottesville, VA, USA, 2015.

EUCH KHAY, S. E. et al. Laboratory investigation of cement-treated reclaimed asphalt pavement material. **Journal of materials in civil engineering**, v. 27, n. 6, p. 04014192, 2015.

LEE, H. et al. **Development of quality standards for inclusion of high recycled asphalt pavement content in asphalt mixtures-phase II**. University of Iowa. Public Policy Center, 2015.

LIMA, D. S. A. **Efeito da adição de cimento Portland e RAP na estabilização de solo argiloso da formação Guabirotuba**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Dissertação de Mestrado. 2020.

MACGREGOR, J. A. C. et al. Structural numbers for reclaimed asphalt pavement base and subbase course mixes. **Transportation research record**, v. 1687, n. 1, p. 22-28, 1999.

MARINI. **MAGNUM MAX - Usinas de Asfalto**. Cachoeirinha: Bomag Marini Latin America, 2018a.

MARINI. **Usinas de Solos - US MAX**. Cachoeirinha: Bomag Marini Latin America, 2018b.

MOKWA, R. L. et al. **Evaluation of the engineering characteristics of RAP/aggregate blends**. Montana. Dept. of Transportation. Research Programs, 2005.

MOUSA, R.; MOUSA, M. Viability assessment of using reclaimed asphalt pavement—Sand blend in road construction: A case study in Egypt. In: **Proceedings of the 96th Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, DC, USA**. 2017. p. 8-12.

MUSTAPHA et al. Stabilization of A-6 Lateritic Soil using Cold Reclaimed Asphalt Pavement. International. **Journal of Engineering and Technology**. Volume 4 No. 1, 2014.

OGUNRINDE, E. O. et al. Development of an Empirical Model for A-6 Soil Stabilised with Reclaimed Asphalt Pavement. **2nd International Civil Engineering Conference**, Minna, Nigeria, 2020.

SANTOS, A. J et al. Avaliação do comportamento mecânico de um solo laterítico e um solo não-laterítico estabilizado com asfalto fresado. **XIV Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Foz do Iguaçu/PR. 2018.

SAVIETTO, J. P.. **Análise de impactos ambientais da restauração de um pavimento asfáltico pela Avaliação do Ciclo de Vida**. 2017. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SAEED, S. A. et al. Evaluation of Incorporating CKD and RAP on the Performance of Cohesive Soil. **Iraqi Journal of Civil Engineering**, v. 16, n. 2, 2022.

SEFEROĞLU, A.I.G.; SEFEROĞLU, M. T.; AKPINAR, M. Vefa. Experimental study on cement-treated and untreated RAP blended bases: Cyclic plate loading test. **Construction and building materials**, v. 182, p. 580-587, 2018.

SULTAN, S. A, et al. Improvement of the mechanical characteristics of reclaimed asphalt pavement in Iraq. **Int. J. Struct. Civil Eng. Res**, v. 2, p. 22-29, 2013.

TAHA, R. et al. Evaluation of reclaimed asphalt pavement aggregate in road bases and subbases. **Transportation Research Record**, v. 1652, n. 1, p. 264-269, 1999.

ULLAH, S.; TANYU, B. F. Methodology to develop design guidelines to construct unbound base course with reclaimed asphalt pavement (RAP). **Construction and building materials**, v. 223, p. 463-476, 2019.

WANG, H. et al. Life-cycle assessment of airport pavement design alternatives for energy and environmental impacts. **Journal of Cleaner Production**, v. 133, p. 163-171, 2016.

WIRTGEN **Recicladoras a frio e estabilizadores do solo série WR**, Windhagen: Wirtgen GmbH, 2020.

YUAN, D. et al. **Cement treated RAP mixes for roadway bases**. 2010.