

Dosagem de misturas asfálticas recicladas à quente com diferentes teores de material fresado

Dosing of hot recycled asphalt mixtures with different levels of milled material

Felipe Cipriani Luzzi(1); Luciano Pivoto Specht(2); Vinicius da Silva Alves(3)

1 Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil.

E-mail: fcluzzi@gmail.com | ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6110-4570>

2 Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil.

E-mail: luspecht@gmail.com

3 MV PAV Engenharia, Porto Alegre, RS, Brasil.

E-mail: mvpavengenharia@gmail.com

Revista de Engenharia Civil IMED, Passo Fundo, vol. 8, n. 1, p. 23-39, janeiro-junho, 2021 - ISSN 2358-6508

[Recebido: Maio 19, 2019; Aceito: Junho 20, 2020]

DOI: <https://doi.org/10.18256/2358-6508.2021.v8i1.3327>

Sistema de Avaliação: *Double Blind Review*

Editora: Aline Zanchet

Como citar este artigo / How to cite item: [clique aqui/click here!](#)

Resumo

Os pavimentos asfálticos vêm apresentando deficiências estruturais e funcionais devido ao crescente fluxo de veículos comerciais em todo o território nacional. A técnica de reciclagem de pavimentos é uma alternativa para a manutenção das condições ideais de segurança e conforto aos usuários, mantendo os padrões técnicos e as condições ambientais envolvidas. Diante disto, este trabalho procurou avaliar misturas recicladas à quente com a incorporação de material fresado (RAP). As dosagens foram elaboradas com 10, 20 e 30% de RAP e seus resultados de Módulo de Resiliência (MR) e Resistência a Tração por compressão diametral (RT) foram comparados aos de um projeto de referência, sem a adição de RAP. Os resultados obtidos demonstraram que, para os critérios avaliados, os valores dos ensaios sofreram acréscimo conforme o aumento do percentual de RAP incorporado, sendo em torno de 50% para o MR e aproximadamente 40% o RT, evidenciando a possibilidade de melhoria na utilização da técnica. A redução da inserção de ligante asfáltico novo também pôde ser observada e, seu valor diminuiu, em, aproximadamente, 17%. Avalia-se que a técnica de reciclagem à quente de pavimentos é técnica, econômica e ambientalmente viável, podendo ser incluída nas práticas de pavimentação quanto a elaboração, usinagem e aplicação destas misturas em campo.

Palavras-chave: Material fresado. Dosagem asfálticas. Reciclagem à quente.

Abstract

The asphaltic pavements have presented structural and functional deficiencies due to the increasing flow of commercial vehicles throughout the national territory. The pavement recycling technique is an alternative for the maintenance of the ideal conditions of safety and comfort to the users, maintaining the technical standards and the environmental conditions involved. In the light of this, this work tried to evaluate hot recycled mixtures with the incorporation of milled material. The dosages were prepared with 10, 20 and 30% RAP and their results of Resilience Module (TM) and tensile strength by diametrical compression (RT) were compared to those of a reference design without the addition of RAP. The results obtained showed that, for the evaluated criteria, the values of the tests increased as the percentage of incorporated RAP increased, being around 50% for the RM and approximately 40% for the RT, evidencing the possibility of improvement in the use of the technique. The reduction of the new asphalt binder insert could also be observed and its value decreased by approximately 17%. It is evaluated that the technique of hot recycling of pavements is technically, economically and environmentally feasible, being able to be included in the paving practices as to the elaboration, machining and application of these mixtures in the field.

Keywords: Milling material. Dosing of asphalt mixtures. Hot recycling.

1 Introdução

De modo geral, os pavimentos asfálticos vêm apresentando deficiências funcionais e estruturais com o crescimento constante do tráfego de veículos comerciais nas rodovias brasileiras ao longo dos anos. De acordo com o Anuário Estatístico de Segurança Rodoviária (MTPA, 2017), a frota de caminhões cresceu 46% e a de ônibus 38,8%, entre os anos de 2010 a 2017. Além disto, a falta ou incorreta manutenção, critérios na escolha de materiais e dimensionamento podem contribuir com a degradação precoce e redução da vida útil do pavimento. Assim, a necessidade de conservação rotineira se torna indispensável para a manutenção do pavimento e da garantia da segurança e conforto aos usuários das rodovias. O pouco recurso despendido para melhorias na infraestrutura de transportes, o qual não chega a 0,5% do PIB brasileiro ao ano, aliado a precariedade da malha rodoviária nacional, onde 48,5% das rodovias não apresentam condições adequadas (CNT, 2018), levantam a possibilidade de soluções alternativas de manutenção e construção de novos pavimentos.

A técnica de reciclagem de pavimentos surge como uma solução para a manutenção de pavimentos, de modo que a qualidade do produto final não seja alterada, e, ainda, há a possibilidade de redução de consumo de materiais, bem como a diminuição dos impactos ambientais envolvidos. Esta técnica consiste, principalmente, na reutilização de material fresado (do inglês - Reclaimed Asphalt Pavement – RAP), originário, geralmente, de serviços de conservação e manutenção de revestimento, em novas camadas do pavimento.

Conforme o Manual de Restauração de Pavimentos do DNIT (2006), a reciclagem de pavimentos consiste em uma solução para alguns problemas encontrados nos grandes centros urbanos e, ainda, oferece inúmeras vantagens em relação à utilização de materiais virgens convencionais. Entre os benefícios da reciclagem está a conservação de agregados, ligantes e de energia, bem como a preservação ambiental e, também, a restauração das condições geométricas existentes, além da diminuição dos custos com implantação.

Na Associação de Reabilitação e Reciclagem de Pavimentos – ARRA (1997), a reciclagem de pavimentos resulta em grande economia de recursos, tempo e energia. Além disto, contribui para a solução do problema da disposição de materiais ao longo das rodovias. Como vantagens específicas se pode citar a redução de custos na construção, reaproveitamento de agregados e ligantes, preservação da geometria existente e meio ambiente, economia de energia nas etapas de produção, transporte e extração de matérias primas, bem como o menor tempo de execução.

Ressalta-se que, a importância do tema e a continuação de pesquisas no setor de pavimentação no Brasil, é indispensável. Estes estudos podem gerar resultados quanto às características técnicas do produto resultante, a reutilização de materiais

provenientes da conservação e manutenção de rodovias deterioradas, a possibilidade da redução da inserção de materiais asfálticos novos e agregados virgens, a redução da emissão de gases bem como o menor consumo de combustíveis.

Deste modo, esta pesquisa objetivou avaliar o comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas usinadas à quente, através dos ensaios de Módulo de Resiliência (MR) e Resistência a Tração por compressão diametral (RT), dosadas com inserção de 10, 20 e 30% de RAP, comparadas a um projeto de referência (sem adição de RAP), bem como verificar a possibilidade da menor incorporação de ligante asfáltico novo nestas misturas.

2 Referencial Teórico

2.1 Reciclagem de Pavimentos

A técnica de reciclagem de pavimentos, que é estudada há mais de cem anos (KANDHAL; MALLICK, 1997), teve seu uso estabelecido a partir do final da década de 1970, após os preços de ligante asfáltico subirem exponencialmente devido ao embargo de fornecimento de petróleo pelos países árabes e membros da Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP). A partir deste momento, departamentos de transportes e a indústria da pavimentação iniciaram o desenvolvimento de métodos e processos de reciclagem que se tornaram rotina de reabilitação de pavimentos em alguns países (WEST et al., 2013). Com um novo aumento dos preços do petróleo em 2008, diversos países voltaram a concentrar esforços para aprimorar as técnicas de reciclagem.

Além do citado anteriormente, a necessidade de proteger o meio ambiente propiciou o uso da reciclagem de materiais para a pavimentação e a economia de agregados, espaços para descargas de materiais, redução do consumo de energia e gases do efeito estufa, são resultados deste processo. Os materiais de pavimentação, quando livres de alcatrão ou fibras de amianto, são considerados inertes e tem a possibilidade de reciclagem. Cabe aqui salientar que os ensaios para a determinação da indicação destes materiais são realizados apenas em caso de suspeita, pois representam custos adicionais e tempo de resposta elevado (BROSSEAUD, 2011).

A realização do serviço de reciclagem de pavimentos está diretamente ligada à economia de recursos e ao cuidado ambiental proposto pela técnica. Estudo realizado por Savietto (2017) indicou redução de todos os impactos ambientais potenciais totais em consequência da utilização de RAP em obra de restauração asfáltica, principalmente no impacto atribuído à produção de materiais. Torna-se importante pela diminuição da utilização de agregados virgens e da quantidade de ligante asfáltico novo necessário na produção de misturas asfálticas. Além destes, pode-se citar a economia de energia e custos de transporte necessários para obter agregados virgens de qualidade e propõe a preservação dos recursos naturais. No CAP remanescente do

fresado há a necessidade de cuidados, pois o processo de aquecimento da usinagem propicia a oxidação e volatilização do ligante, o que pode ocasionar a perda da capacidade de suas propriedades originais. Estas podem ser reestabelecidas pela utilização de ligantes novos e/ou a adição de agente rejuvenescedor.

Além dos benefícios citados anteriormente, é possível reduzir a quantidade de resíduos de construção depositada em aterros. A reciclagem de pavimentos aperfeiçoa o uso de recursos naturais e possibilita à indústria da construção de pavimentos que o processo possa ser realizado de maneira sustentável. Deste modo, nota-se que a reciclagem de pavimentos asfálticos proporciona a menor utilização de espaço em aterros sanitários e, ainda, a possibilidade de economia dos custos de transportes (FHWA, 1996).

Dentre as principais possibilidades da utilização de reciclagem de pavimentos, a Asphalt Recycling and Reclaiming Association (ARRA, 1997), descreve os principais métodos como o “Hot recycling” - Reciclagem à quente em usina, “Hot in-place recycling (HIR)” - Reciclagem à quente no local e “Cold in-place recycling (CIR)” - Reciclagem a frio no local.

2.2 Reciclagem de Pavimentos à Quente

As dosagens realizadas nesta pesquisa foram elaboradas com a técnica de reciclagem à quente. Técnica iniciada por meados da década de 1970 e, se tornando mais importante com o crescimento da crise econômica à época (VASCONCELOS; SOARES, 2003). Podem ser destacados como os dois principais métodos de reciclagem à quente no país, “in situ” e em usina. O produto final destes métodos deve atender as condições de misturas asfálticas destinadas a camada de base, “binder” ou camada de rolamento.

A reciclagem à quente “in situ” é o método que consiste no aquecimento e amolecimento do pavimento existente e, posteriormente, é escarificado até a profundidade especificada. (ARRA, 1997). Esta técnica, ainda, tem a vantagem de eliminar fissuras superficiais, assim como a correção de afundamentos de trilha de roda e rejuvenescimento de camadas asfálticas envelhecidas. Os custos envolvidos são minimizados e, na execução, há pouca interferência no tráfego de veículos.

A reciclagem à quente em usinas pode ser realizada tanto em gravimétricas (por batelada – tipo intermitente) assim como nas centrais volumétricas. A segunda citada é a mais utilizada, mas ainda é necessária a adaptação destas para incorporação do RAP em novas misturas asfálticas para não sofrer aquecimento direto pela chama do secador, quando do processo de secagem dos materiais agregados, mantendo as características técnicas esperadas no seu comportamento.

Segundo o Asphalt Institute (1986), este método de reciclagem pode ser definido como um processo que o material recuperado proveniente do pavimento asfáltico deteriorado (RAP) é combinado com um novo ligante asfáltico (com ou sem utilização

de agente rejuvenescedor) e/ou agregados virgens – de acordo com a necessidade – para a produção e distribuição de novas misturas asfálticas que atendam as especificações vigentes.

2.3 Pesquisas com Reciclagem de Pavimentos à Quente

Com as preocupações com a melhoria da qualidade técnica das misturas asfálticas, os grandes custos envolvidos com as técnicas normalmente aplicadas e a preocupação ambiental com descarte, emissão de gases e consumo de combustíveis, pesquisas laboratoriais e de campo com utilização de material fresado estão sendo desenvolvidas.

Zubaran (2014) estudou dosagens de misturas recicladas à quente utilizando agente rejuvenescedor (AR 75) e 30 e 50% de RAP em laboratório, usinando, em campo, uma mistura de referência (sem RAP e AR 75) e uma contendo 50% de material fresado e 80% de AR 75. As amostras foram submetidas a avaliações mecânicas, de volumetria e envelhecimento do ligante asfáltico presente no material fresado. Os resultados são promissores e indicam viabilidade econômica, ambiental e técnica da reciclagem morna mediante critérios de seleção de materiais e projetos e considerando as características dos equipamentos utilizados.

Em seu trabalho, Centofante (2016) também avaliou misturas asfálticas recicladas à quente em ensaios laboratoriais determinando as propriedades mecânicas e de adesividade de misturas com 10, 20 e 30% de material fresado em comparação a uma mistura de referência, sem adição de RAP. Os resultados demonstraram a validade da técnica, com a melhoria das propriedades citadas em função do percentual de RAP inserido, citando-se um ganho, entre a mistura de referência e a com 30% de RAP, de 66% na Resistência a Tração à Compressão Diametral e 46% no Módulo de Resiliência. O mesmo autor identificou que a inserção de material fresado não influencia diretamente nos resultados frente à fadiga.

Com o intuito de avaliar diferentes misturas recicladas à quente como alternativa para uso em camadas de elevado módulo de elasticidade em pavimentos flexíveis, a partir de incorporação de altos teores de material fresado, Segundo et al. (2016) concluíram que ao se utilizar elevadas taxas de RAP (75 e 100%), estas misturas podem ser uma boa alternativa para uso de camadas de base e em camadas de ligação de pavimentos especiais. O mesmo autor relata que esta técnica pode apresentar vantagens como: pavimentos mais delgados se comparados a estruturas com camadas granulares, a economia de recursos naturais, de transportes da usina até a obra e emissão de poluentes, além de reduzir o potencial de dano por fadiga e minimizar as deformações por tração na fibra inferior da camada de revestimento.

Nas pesquisas apresentadas, são evidentes os bons resultados encontrados pelos autores. Estes são exemplos das possibilidades de evolução de pesquisas e trabalhos

relacionados ao tema, bem como a de utilização e elaboração de especificações e normativas para a viabilidade da introdução da técnica em meio aos modos de execução da pavimentação brasileira.

3 Materiais e Métodos

Para a elaboração dos projetos, utilizou-se a metodologia de ensaio do DNER 043/1995 e a dosagem realizada a partir da metodologia Marshall. A técnica foi escolhida por ainda ser a mais difundida e a de maior conhecimento entre os técnicos de pavimentação brasileiros, facilitando o entendimento para elaboração de projetos, usinagem e controle tecnológico das misturas produzidas. Foram utilizados agregados de origem granítica de unidade de britagem do Município de Eldorado do Sul/RS, ligante modificado por polímero, do tipo 60/85 e o material fresado coletado na rodovia BR-290/RS no trecho que abrange os municípios entre Osório e Porto Alegre (Freeway), com mini fresadora. Através da metodologia Marshall, foi realizada a dosagem de 4 projetos de concreto asfáltico: um de referência (sem adição de RAP) e os outros 3 com 10, 20 e 30% de material fresado, respectivamente. As composições granulométricas foram desenvolvidas de acordo com a Especificação de Serviço DNIT 31/2006.

O RAP foi caracterizado de modo a conhecer o teor de ligante, granulometria e umidade presente. O teor médio de ligante asfáltico encontrado foi de 4,77% e a umidade do material aproximadamente 4,23%. Este material foi recolhido do campo e, após, foi beneficiado com a separação das frações na peneira 3/4, em equipamento adaptado na própria usina (Figura 1), para a possibilidade de utilização de maior porcentagem de incorporação de RAP nas dosagens.

Figura 1. Equipamento para separação das frações de RAP



Fonte: Autor, 2018.

O material está estocado sobre uma base impermeável, protegido de intempéries e também livre de contaminações. Estes cuidados com o RAP devem ser levados em conta, pois influenciam diretamente na qualidade do produto final. É relevante comentar que os materiais das dosagens aqui utilizados serão, posteriormente, misturados em usina adaptada para entrada de RAP e distribuídos como camada asfáltica de pavimento e analisados quanto ao seu desempenho em pista.

Na caracterização do material fresado, a determinação do tipo de CAP existente no RAP também é importante e foi realizada através da recuperação do CAP pelo método Abson e, no CAP recuperado, os ensaios de recuperação elástica a 25°C, ponto de amolecimento, penetração a 25°C, viscosidade Brookfield em 3 temperaturas foram realizados, e os resultados resumidos na Tabela 1.

Tabela 1. Características do CAP do material fresado após extração pelo método Abson

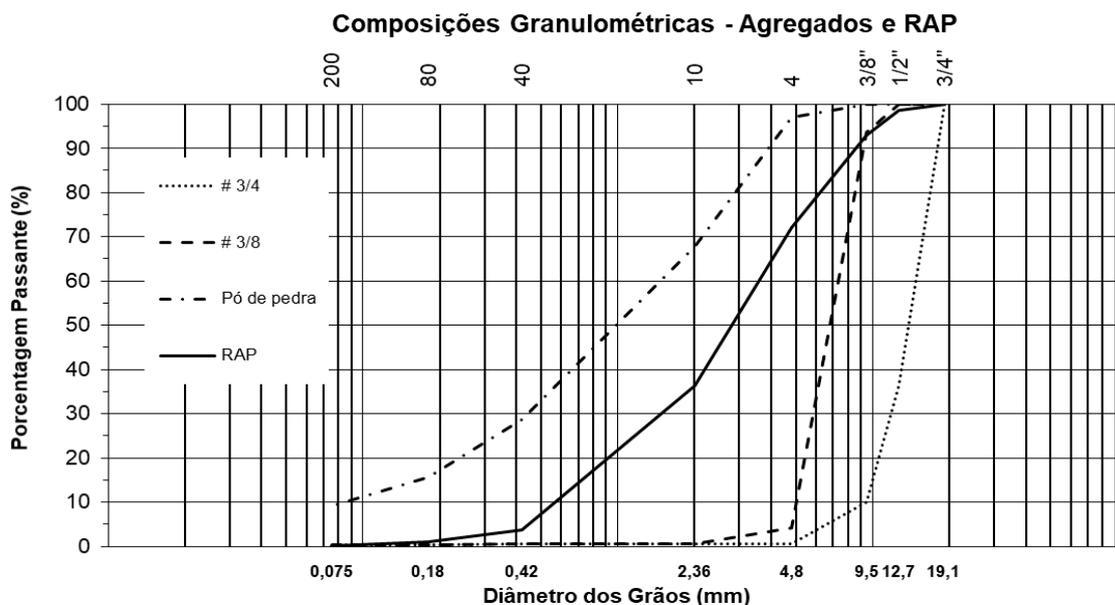
Ensaio	Referência	Am1	Am 2	Média Amostras
Recuperação Elástica	> 68	40	38	39
Ponto de Amolecimento	55 a 67	62	79	70,5
Penetração a 25°C	24 a 42	26	12	19
Teor de CAP	---	5	4,2	4,6
Viscosidade Brookfield 135°C	<3000	1481	5706	3593,5
Viscosidade Brookfield 150°C	<2000	648	2057	1352,5
Viscosidade Brookfield 177°C	<1000	201	548	374,5

Fonte: Autor, 2018.

Verifica-se que, a partir dos dados relacionados na Tabela 1, que as amostras de RAP coletadas são de misturas asfálticas que se utilizavam de ligante asfáltico com polímero em sua composição, de acordo com dados de ponto de amolecimento, penetração, viscosidade e recuperação elástica, os quais, mesmo que um pouco diferentes da referência, são condizentes com asfaltos modificados. Cabe salientar que um outro cuidado nos trabalhos utilizando RAP é com a sua heterogeneidade, visto que mesmo com a homogeneização das pilhas de material fresado os resultados de ensaios são distintos quando se compara Am1 e Am2, principalmente os de viscosidade Brookfield e penetração, que podem estar ligados ao envelhecimento do RAP. É importante aqui ressaltar que nos últimos anos a Concessionária administradora da rodovia utilizava apenas soluções em concreto asfáltico com ligante modificado por polímero, corroborando com os resultados encontrados nos ensaios. A presença do ligante asfáltico polimérico pode beneficiar os resultados de desempenho das misturas.

A granulometria dos materiais agregados e o RAP passante na peneira 3/4 foi realizada através das diretrizes da norma DNER ME 083/98 e na Figura 2 estão ilustradas as curvas encontradas para cada um dos materiais analisados.

Figura 2. Granulometrias encontradas dos materiais agregados e RAP



Fonte: Autor, 2018.

4 Análise de Resultados

A partir das curvas granulométricas definidas dos agregados britados e material fresado, as curvas das misturas asfálticas foram definidas respeitando a faixa C da Especificação de Serviços 31/2006, do DNIT, e as suas respectivas tolerâncias admissíveis.

Ainda, buscando manter a qualidade final das misturas produzidas e respeitando as condicionantes impostas pela usina de asfalto, de acordo com o processo de incorporação de material fresado proposto (a frio diretamente no misturador), o limitante de quantidade de RAP a utilizar nos projetos foi de 30%, em massa.

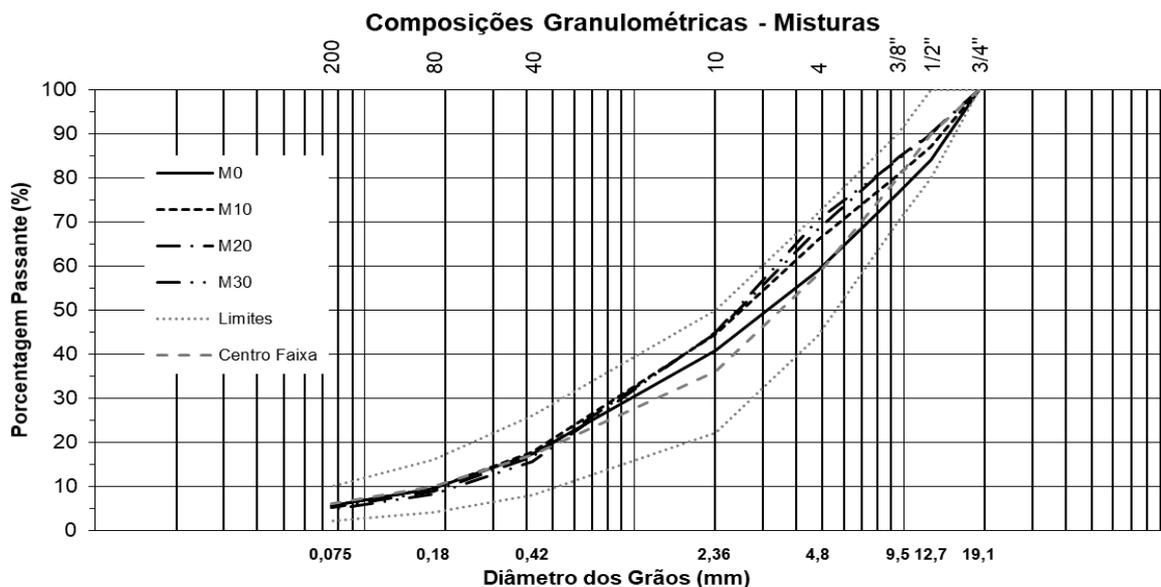
Partindo-se da condição de tentativas em melhor adequar a curva ao centro da especificação da norma supracitada, as porcentagens definidas de cada fração de material estão evidenciadas na Tabela 2.

Tabela 2. Definição das porcentagens dos materiais agregados e RAP nas misturas

Fração agregado/RAP	Referência	10% fresado	20% fresado	30% fresado
	M0	M10	M20	M30
Fração 3/4" (%)	25,00	20,00	15,00	15,00
Fração 3/8" (%)	15,00	10,00	10,00	5,00
Fração Pó de pedra (%)	60,00	60,00	55,00	50,00
RAP (%)	0,00	10,00	20,00	30,00

Fonte: Autor, 2018.

Estes projetos estão ilustrados nas curvas granulométricas da Figura 3 e, as mesmas estão dentro dos limites estabelecidos.

Figura 3. Curvas granulométricas das misturas asfálticas

As quatro curvas definidas foram, então, dosadas através da metodologia Marshall. Nos projetos com a incorporação de fresado, foi realizada a diminuição de inserção de ligante novo nas misturas, pois notou-se a possibilidade de utilização de parte ou todo o ligante asfáltico envelhecido presente no RAP. Este material foi aquecido apenas a 110°C, anteriormente a entrada deste na mistura, com o cuidado de não causar um maior envelhecimento ao CAP presente no RAP. Os demais materiais seguiram as preconizações normais da metodologia citada anteriormente, pela metodologia de ensaio DNER 043/1995.

A definição dos teores ótimos de cada projeto seguiu a proposta de manter o volume de vazios entre 3 e 5%, com maior aproximação possível do centro, 4%. Nota-se que praticamente todos os parâmetros encontram-se dentro das faixas estabelecidas, evidenciando a possibilidade de bons resultados quando em análises específicas destas misturas. Outro ponto é a redução de incorporação de CAP novo nas misturas. Esta economia em ligante asfáltico se aproxima, em média, de 17%. A Tabela 3, abaixo, resume as características encontradas após as dosagens.

Tabela 3. Resumo das dosagens dos projetos de concreto asfáltico

Características Marshall	ES 31/2006	Resultados Projetos			
		M0	M10	M20	M30
Teor de ligante asfáltico a inserir (%)	---	5,65	5,30	4,85	3,87
Teor de ligante Total (%)	---	5,65	5,77	5,81	5,30
Volume de Vazios (%)	3 a 5	4,01	3,96	4,11	4,05
RBV (%)	75 a 82	76,51	75,27	72,90	68,46
VAM (%)	> 15	17,01	16,09	15,26	13,04
Massa específica máxima medida – RICE (KN/m ³)	---	2,398	2,393	2,407	2,432
M. esp. aparente (KN/m ³)	---	2,302	2,299	2,308	2,329
Estabilidade 60° C (Kgf)	> 500	1467	1388	1658	1971
Fluência 60° C (1/100'') (%)	8 a 16	11	10	10	11
Temp. Mistura (°C)	Cv temp. x	161 a 167			
Temp. Compactação (°C)	viscosidade	143 a 149			

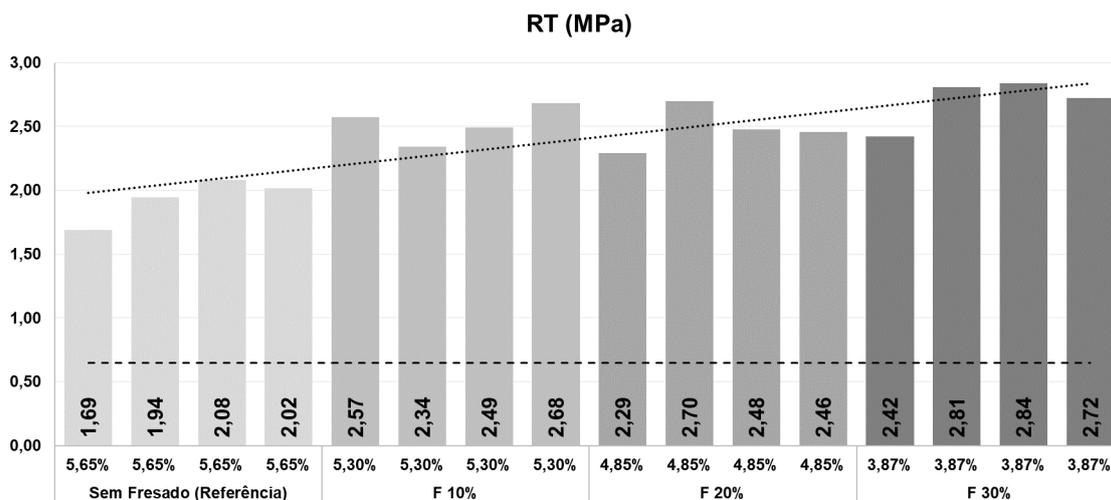
Fonte: Autor, 2018.

Bohn (2016) em sua pesquisa também avaliou o percentual de ligante novo a inserir e verificou a possibilidade de redução de, aproximadamente, 50%, o que destaca a reutilização do ligante envelhecido presente no RAP. Corroborando com o descrito, Centofante (2016), dosando misturas asfálticas recicladas à quente, também reduziu a quantidade de ligante novo necessário nas misturas. A porcentagem de redução ficou em torno de 35%.

De acordo com o explanado nas pesquisas anteriores, a análise da redução de custos com a aquisição de materiais asfálticos se torna indispensável. O aumento sucessivo dos preços de materiais como o CAP, por exemplo, encarece as soluções de manutenção e construção de pavimentos asfálticos, acarretando no menor volume de serviços e melhorias realizadas. Cabe salientar que os custos com transporte de materiais da obra até a usina e o beneficiamento do RAP não estão detalhados, mas a redução de incorporação de ligante, que é o insumo “A” das obras de pavimentação, indica a possibilidade de ganhos financeiros.

Foram moldados quatro corpos-de-prova (CP's) por projeto de dosagem realizados e submetidos a ensaios de Módulo de Resiliência (MR – norma DNIT ME 0135/2010) e a Resistência a Tração (RT – norma DNIT 0136/2010) com o objetivo de inferir o comportamento a deformações permanentes e a fadiga da mistura convencional e as recicladas à quente. Na Figura 4 estão resumidos os resultados encontrados de RT.

Figura 4. Resultados de resistência a tração

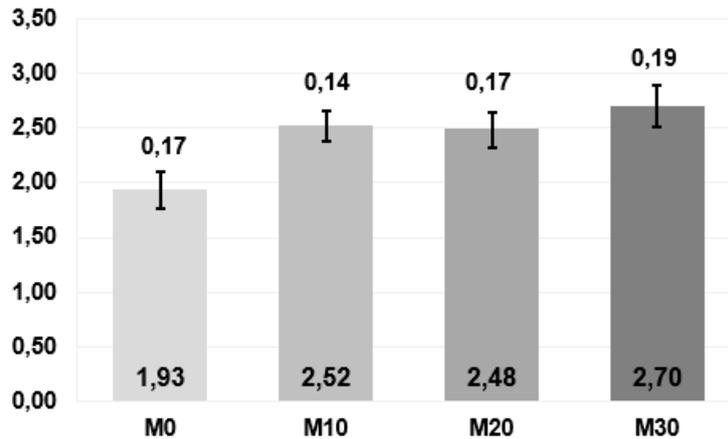


Fonte: Autor, 2018.

Bernucci et al. (2008), descrevem como valores usuais de Resistência a Tração os limites mínimo e máximo em 0,5 e 2,0 MPa, respectivamente. DNIT ES 31/2006, limita como mínimo em 0,65 MPa. Verifica-se que todos os resultados obtidos se adequam à normativa existente e o que é instruído na bibliografia nacional.

Verifica-se que os valores de RT aumentam conforme a maior incorporação de RAP na mistura, conforme linha de tendência ilustrada no gráfico. Este comportamento era inicialmente esperado, pois o ligante asfáltico envelhecido no material fresado possui módulo de rigidez mais elevado contribuindo para esta característica na mistura final. Em média, a RT do projeto M30 é em torno de 40% maior quando comparado ao projeto de referência. Este comportamento se nota em todos os projetos, com exceção ao M20, que reduz ligeiramente estes valores quando comparado ao projeto com 10%. Esta queda pode estar associada aos diferentes graus de envelhecimento do CAP presente no RAP destas misturas, bem como diferente interação entre este e o novo inserido, mas pelas pequenas diferenças de RAP inserido (10% entre um projeto e outro) há dificuldade em verificar estas duas características e certificar a principal causa desta diferença de comportamento. Na Figura 5 pode-se verificar os valores médios e desvios padrão de RT.

Figura 5. Resultados médios e desvios padrão de resistência a tração

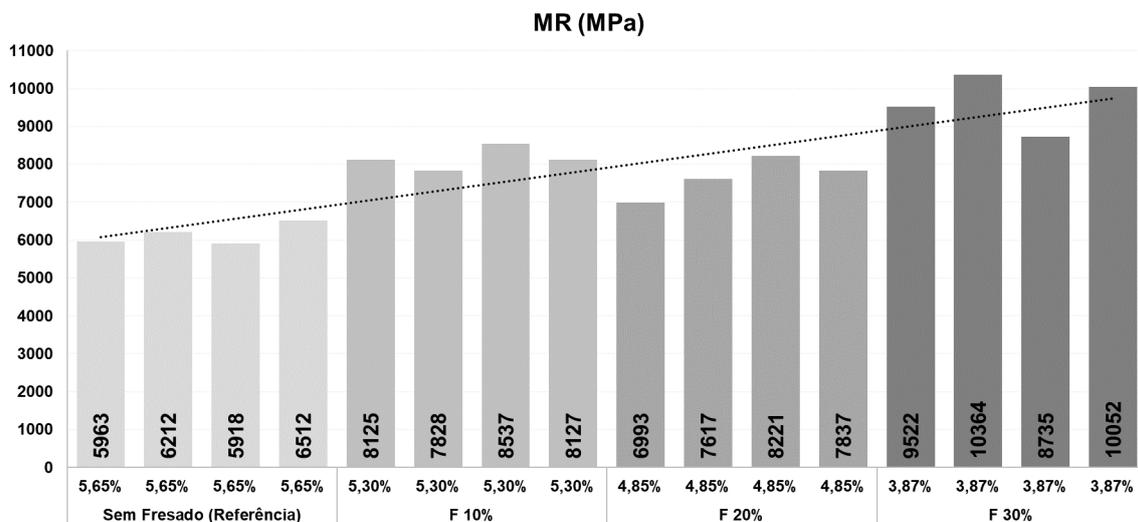


Fonte: Autor, 2018.

Bohn (2017), analisando misturas recicladas à quente e mornas, verificou resultados semelhantes quanto ao maior percentual de RAP nas misturas, ou seja, os valores de RT sofreram acréscimo conforme o aumento da porcentagem de RAP inserido nas misturas. Corroborando com o acima descrito, Centofante (2016) verificou um incremento de Resistência Tração maior que 60% quando comparada a dosagem com 30% de fresado e a de referência (sem adição de RAP).

Segundo Bernucci et al. (2008), os valores normais de MR variam entre 2000 e 8000 MPa. Todos os resultados obtidos neste trabalho encontram-se dentro ou acima do limite superior, demonstrando o elevado módulo das misturas com a adição do material fresado, conforme ilustrado em gráfico da Figura 6. A análise das misturas de alto módulo pode ser complementada com verificações de curvas de fadiga, as quais podem inferir o comportamento quanto a formação de trincas na fibra inferior do revestimento, podendo ser precoces no caso de alta rigidez das misturas.

Figura 6. Resultados de módulo de resiliência

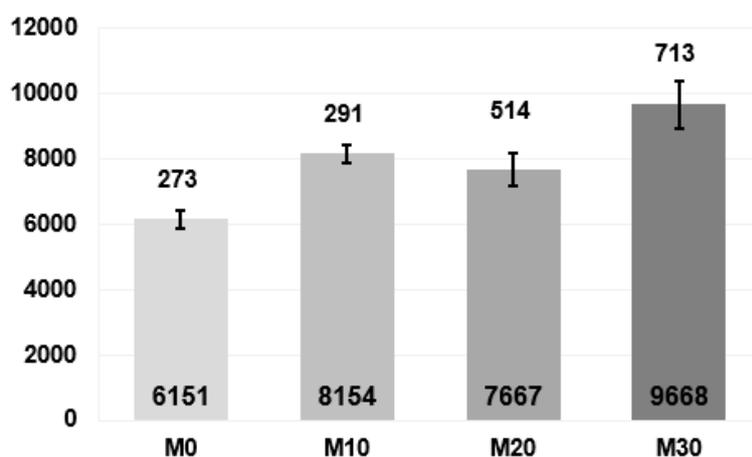


Fonte: Autor, 2018.

Quando analisado o gráfico acima exposto, as conclusões quanto ao comportamento do MR das misturas se assemelham as obtidas na Resistência a Tração, na qual se verificou o acréscimo de valores pelo maior percentual de RAP incorporado à mistura, com exceção quando da comparação entre o projeto M20 e M10. A conclusão para este comportamento diferente não é explicado apenas por uma característica específica do RAP e suas interações com o ligante novo. Pelo gráfico da Figura 7 pode-se observar que os valores de MR para estas duas misturas são muito semelhantes, o que corrobora com a dificuldade de determinação de possíveis causas referentes ao comportamento entre elas. É necessária uma avaliação de características relacionadas ao ligante asfáltico novo inserido, bem como o grau de envelhecimento e possibilidade de reutilização do CAP presente no RAP.

Quando comparados os projetos extremos, M0 e o M30, calculou-se um aumento de aproximadamente 57% no valor de MR. Assim como anteriormente, o enrijecimento da mistura em função do ligante asfáltico envelhecido no RAP pode contribuir para este comportamento.

Figura 7. Resultados médios e desvios padrão de Módulo de Resiliência



Fonte: Autor, 2018.

Zubaran (2014), Bonh (2017) e Centofante (2016) estudaram misturas recicladas à quente com diferentes teores de fresado. O primeiro autor encontrou, avaliando misturas com 50% de RAP, valores de MR entre 10 e 33% acima do projeto de referência, sem adição de RAP. Nas duas pesquisas seguintes, os resultados variaram entre 33 e 78% e de 24 a 100% maiores que o projeto sem a adição de fresado. Verifica-se, a partir de variadas pesquisas realizadas, os benefícios gerados a partir da utilização da técnica.

5 Considerações finais

Na análise das dosagens das quatro misturas, pôde-se avaliar a economia de ligante asfáltico novo a inserir nas misturas recicladas, demonstrando a possibilidade

de reutilização do CAP presente no RAP mesmo sem a utilização de um agente rejuvenescedor. Por se tratar do insumo mais caro para a execução de misturas asfálticas, evidencia-se a contribuição da utilização de RAP na possibilidade de ganhos financeiros sem a perda de qualidade técnica.

Quanto aos resultados dos ensaios analisados, módulo de resiliência e resistência a tração, verificou-se um comportamento de acréscimo de valores em função do maior percentual de RAP incorporado nas misturas. Ainda, pôde-se observar que os resultados, tanto de MR quanto de RT, entre a M10 e M20, possuem um comportamento diferente do esperado, o que pode estar relacionado ao nível de envelhecimento do CAP presente no RAP, bem como nas interações dele com o ligante novo inserido nas misturas. A análise destes valores absolutos não demonstra diretamente a qualidade da mistura quanto ao seu comportamento mecânico, mas dá indícios, com estes bons resultados, que pode resistir bem a possíveis deformações permanentes bem como a fadiga durante o período de vida útil do revestimento.

É importante ressaltar que a aplicação destas misturas recicladas em pista necessita de uma avaliação estrutural diferenciada, pois a simples substituição de camadas de mistura asfáltica por uma reciclada de mesma espessura, por exemplo, pode não revelar o mesmo comportamento mecânico esperado e a caracterização dos resultados pode ser avaliado de maneira errônea, assim não validando os bons resultados encontrados nas dosagens e ensaios iniciais.

Cabe lembrar que, posteriormente a estas dosagens em laboratório, estas misturas serão levadas a usina adaptada e ensaios específicos relativos à vida de fadiga e deformação permanente serão realizados para a completa caracterização mecânica.

É de grande relevância continuar os estudos deste trabalho, incorporando não apenas RAP as misturas, mas resíduos que possam contribuir para a melhoria dos parâmetros técnicos dos revestimentos asfálticos, reduzindo custos com a aquisição de materiais e, também, propiciando a manutenção e conservação das condições ambientais envolvidas no processo, como a menor exploração de recursos naturais, a menor probabilidade de contaminação de solos e água, a redução de consumo de combustíveis e emissão de gases, bem como a redução da utilização de espaços físicos para acomodação de resíduos que podem ser reutilizados.

Referências

- ASPHALT INSTITUTE. *Asphalt Hot-Mix Recycling*. Manual Series n. 20 (MS-20). Second Edition. College Park, Maryland, USA. 1986.
- ASPHALT RECYCLING AND RECLAIMING ASSOCIATION - ARRA. *Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments Participant's Reference Book*. U.S. Department of Transportation, FHWA-SA-98-042, Washington, D.C. December, 1997.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. *Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros*. Rio de Janeiro. PETROBRAS: ABEDA, 2008. 475 p.
- BOHN, K. A. *Avaliação de Misturas Asfálticas Recicladas Mornas com Uso de Ligantes Convencional e Modificado por Polímero*. 255 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2017.
- BROSSEAUD, Y. *Reciclagem de misturas asfálticas: Evolução após 20 anos e a situação atual na França*. 3º Salão de Inovação ABCR – 7º Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões, Foz do Iguaçu/PR, 2011.
- CENTOFANTE, R. *Estudo Laboratorial da Utilização de Material Fresado em Misturas Asfálticas Recicladas à quente*. 2016. 162 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2016.
- Confederação Nacional de Transportes CNT. *Transporte rodoviário: desempenho do setor, infraestrutura e investimentos*. 67 p. Brasília. 2018.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. IPR 720: *Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos*. 2º ed. Rio de Janeiro, 2006, 310 p
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. *ME 043: Misturas betuminosas à quente – ensaio Marshall*. Rio de Janeiro, 1995, 11 p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. *ME 083: Agregados – Análise Granulométrica*. Rio de Janeiro, 1998, 5 p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. *ES 031: Pavimentos Flexíveis - Concreto Asfáltico*. Rio de Janeiro, 2006. 14 p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. *Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio*. DNIT – ME 135/2010. Rio de Janeiro, 2010.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. *Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio*. DNIT – ME 136/2010. Rio de Janeiro, 2010.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION - FHWA. *Pavement Recycling Executive Summary and Report*. U.S. Department of Transportation, FHWA-SA-95-060, Washington, D.C. Março, 1996.

KANDHAL, P. S.; MALLICK, R. B. FHWA Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments. Federal Highway Administration, U. S. Department of Transportation. FHWA-SA-98-042. Washington, 1997.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES, PORTOS E AVIAÇÃO CIVIL – MTPA. *Anuário Estatístico de Segurança Rodoviária*. 75 p. Brasília/DF, Brasil, 2017.

SAVIETTO, J. P. *Análise de Impactos Ambientais da Restauração de um Pavimento Asfáltico pela Avaliação do Ciclo de Vida*. 110 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP, SP, 2017.

SEGUNDO, I. G. R.; BRANCO, V. T. F. C.; VASCONCELOS, K. L.; HOLANDA, A. S. Misturas asfálticas recicladas à quente com incorporação de elevado percentual de fresado como alternativa para camada de módulo elevado. *TRANSPORTES*, v. 24, n. 4, 2016.

VASCONCELOS, K. L.; SOARES, J. B. Projeto de Misturas de Concreto Betuminoso Reciclado à quente com Diferentes Teores de Material Fresado. In: *Anais do XII CONGRESSO IBERO LATINOAMERICANO DEL ASFALTO – CILA*. Anais. 2003.

WEST, R.; WILLIS, J. R.; MARASTEANU, M. *Improved mix design, evaluation, and materials management practices for hot mix asphalt with high reclaimed asphalt pavement content*. NCHRP. 2013.

ZUBARAN, M. *Avaliação do comportamento de misturas asfálticas recicladas mornas em laboratório e usina de asfalto*. 2014. 151p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.