ESTUDO PRELIMINAR PARA DOSAGEM DE CONCRETO ASFÁLTICO RECICLADO UTILIZANDO MATERIAIS FRESADOS DE DIFERENTES ORIGENS E IDADES

PRELIMINARY STUDY TO MIX RECYCLED ASPHALT CONCRETE USING MILLED MATERIALS FROM DIFFERENT SOURCES AND AGES

Jamille Freitas Fiuza - fiuzajf@outlook.com - https://orcid.org/0000-0001-5107-8463

Mario Sergio de Souza Almeida - mario.almeida@dnit.gov.br - https://orcid.org/0000-0002-0222-4804

Weiner Gustavo Silva Costa - weiner@ufrb.edu.br - https://orcid.org/0000-0001-6151-8805

Elane Donato Santos - elanedonato@aluno.ufrb.edu.br - https://orcid.org/0009-0007-3409-7102

Paulo Ricardo Lemos de Santana - ricardolemos@aluno.ufrb.edu.br - https://orcid.org/0009-0000-7713-905X

RESUMO: A fresagem é uma das técnicas mais utilizadas para manutenção e restauração de pavimentos asfálticos no Brasil. A aplicação dessa técnica gera volumes consideráveis de resíduos do revestimento antigo, conhecido como material fresado ou RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*), constituído, basicamente, de agregados diversos e ligante asfáltico envelhecido. Este trabalho é um estudo preliminar que avaliou a influência da idade de materiais fresados oriundos de três diferentes rodovias do Estado da Bahia, no comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas a quente produzidas em laboratório e dosadas com elevado percentual de RAP. Após a extração do ligante asfáltico foram realizados ensaios de granulometria do agregado obtido para determinação da curva granulométrica de cada RAP. Seguindo o método de dosagem Marshall, adicionou-se ao RAP agregados virgens e teores crescentes de CAP convencional para moldagem de corpos de prova para determinação da volumetria da mistura, além da estabilidade e fluência. Os resultados indicaram haver influência da idade do RAP na demanda por ligante asfáltico novo na dosagem da mistura reciclada.

PALAVRAS-CHAVE: RAP; sustentabilidade; envelhecimento do CAP.

ABSTRACT: *Milling is one of the most widely used techniques for asphalt sidewalk maintenance and restoration in Brazil. The application of this technique generates considerable volumes of waste from the old coating, known as milled material or RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), consisting basically of various aggregates and aged asphalt binder. This paper is a preliminary study that evaluated the influence of the age of milled material from three different highways in the state of Bahia, in the mechanical behavior of hot recycled asphalt mixtures produced in the laboratory and dosed with a high percentage of RAP. After extraction of the asphalt binder, aggregate granulometry tests were performed to determine the granulometric curve of each RAP. Following the Marshall dosage method, virgin aggregates and increasing levels of conventional PAC were added to the RAP to mold test specimens to determine the volumetry of the mixture, as well as stability and creep. The results indicated that the age of the RAP influences the demand for new asphalt binder in the dosage of the recycled mixture.*

KEYWORDS: *RAP; sustainability; CAP aging.*

Submetido em 26/05/2023 e aceito em 24/08/2023.

https://doi.org/10.70859/2764-9539.v2.n2.43

1 INTRODUÇÃO

A crescente prática na Engenharia rodoviária no uso de técnicas alternativas (ALMEIDA-COSTA e BENTA, 2016; RAPOSEIRAS *et al.*, 2017) e aproveitamento de resíduos diversos em obras de pavimentação, com destaque para borracha de pneus e resíduo de construção e demolição (RCD), vem tendo reflexos ambientais e econômicos em diferentes países (IZAKS *et al.*, 2015; XIE *et al.*, 2017; UNGER FILHO *et al.*, 2020). Entretanto, o material fresado do revestimento asfáltico da própria via, conhecido como RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*), se destaca como o RCD mais utilizado nas obras que optam pelo uso da reciclagem (SEGUNDO *et al.*, 2016, LIZÁRRAGA *et al.*, 2018). No Brasil, em especial, com aproximadamente 213,5 mil km pavimentados, dos quais 99% possuem revestimento asfáltico (CNT, 2022), minerar agregados e ligantes asfálticos envelhecidos em obras de restauração para aproveitamento em misturas asfálticas recicladas vem se tornando uma rotina, principalmente em rodovias concessionadas. De acordo com o manual de restauração de pavimentos asfálticos do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006c), a economia de energia gerada pelo uso da reciclagem de pavimentos asfálticos pode variar entre 16%, quando a mistura é produzida em usina, até 65%, quando a reciclagem é realizada na própria pista.

O aumento do custo do ligante asfáltico nos últimos anos também tem fomentado a utilização de RAP na produção de misturas asfálticas recicladas, aliado ao fato de ser uma alternativa ecológica por reduzir a necessidade de materiais virgens (IZAKS *et al.*, 2015). Nessa linha, Moghaddam e Baaj (2016) destacam que os benefícios relacionados a reutilização de agregados e ligantes asfálticos disponíveis no RAP contribuem para redução significativa no custo de construção do pavimento, atrelado a diferentes benefícios ambientais. Neste cenário, vários estudos ao redor do mundo procuram viabilizar a utilização do RAP em misturas asfálticas quentes, mornas e frias. Izaks *et al.* (2015) projetaram três misturas formadas pela combinação de RAP de duas diferentes origens e agregados locais para rodovias de média e alta intensidade de tráfego. A análise do ligante do RAP mostrou envelhecimento significativo, com penetração em torno de 38 (0,1 mm) e ponto de amolecimento de 56 °C. Foram projetadas misturas contendo 30% e 50% de RAP de cada origem sem uso de agente rejuvenescedor. Foi adicionado, entretanto, um ligante mais macio, caracterizado pela penetração de 70 (0,1 mm), ao invés de um ligante tradicionalmente utilizado na Estônia, cuja penetração se enquadraria no centro da faixa entre 50 e 70 (0,1 mm), para compensar a rigidez provocada pelo envelhecimento do ligante do RAP e, assim, melhorar a qualidade do ligante asfáltico resultante da mistura (velho + novo). Os resultados de ensaios com simulador de tráfego de laboratório HWTD (Hamburg Wheel Tracking Device) demonstraram que todas as misturas recicladas testadas apresentaram alta resistência à deformação permanente (DP) e os resultados dos testes de fadiga usando viga de flexão de quatro pontos foram semelhantes aos observados na mistura tradicional. Estes resultados demonstraram que as misturas recicladas com alto teor de RAP podem ser projetadas com sucesso para atender aos requisitos volumétricos e de desempenho compatíveis com as misturas convencionais.

Lizárraga *et al.* (2018) desenvolveram estudos de laboratório e campo voltados para utilização de elevados teores de RAP (70% e

100%) na dosagem de misturas asfálticas mornas para aplicação em vias urbanas. O RAP foi inicialmente caracterizado para dosagem e, posteriormente, as misturas foram produzidas em uma usina protótipo a uma temperatura de mistura abaixo de 100 °C, com uso de aditivo. Em seguida, para comparar seu desempenho mecânico, seções testes foram construídas com a mistura reciclada morna produzida e com uma mistura a quente convencional. Após um ano da construção das seções testes foram coletadas amostras para avaliação do comportamento mecânico das misturas. Os resultados mostraram que o desempenho das misturas mornas pode ser comparado com o das misturas convencionais a quente em termos de resistência à fadiga e resistência a deformação permanente.

Bolina da Cunha *et al.* (2018) avaliaram o comportamento mecânico de misturas usinadas a quente contendo 50% e 100% de RAP e adição de diferentes teores de cimento asfáltico de petróleo (CAP) novo, entre 2,5% e 4,5%. O RAP utilizado foi proveniente da rodovia BR-290, situada no trecho entre os municípios de Rosário do Sul e São Gabriel, no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. A caracterização do material fresado foi realizada através de ensaios de granulometria, extração de ligante, estabilidade e fluência Marshall e resistência à tração por compressão diametral, em corpos de prova cilíndricos compactados de acordo com a metodologia Marshall. Os resultados obtidos demonstraram valores de estabilidade, fluência e resistência à tração por compressão diametral satisfatórios para a aplicação das misturas asfálticas testadas para uso em camadas de rolamento.

Na utilização dessas misturas, entretanto, um ponto importante a se destacar é a importância da origem e idade do RAP na demanda da mistura asfáltica reciclada pela adição de ligante asfáltico novo, ou mesmo agente de reciclagem que proporcione melhorias nas características de consistência do ligante envelhecido presente no material fresado. Gaspar *et al.* (2020) destacam o desafio de produzir misturas asfálticas recicladas com maior conteúdo RAP sem comprometer o desempenho da mistura no campo. Na reciclagem a quente e morna, segundo os autores, o ligante do RAP é ativado, mas a quantidade que realmente interage com o ligante novo é ainda desconhecida (Figura 1).

Figura 1 – Três cenários possíveis de misturas entre os ligantes asfálticos (novo e envelhecido)

Fonte: Adaptado de Gaspar *et al.* (2020)

Suzuki *et al.* (2023) desenvolveram um estudo para avaliação do efeito de diferentes teores de material fresaso na dosagem e comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas à quente, para aplicação de revestimento de pavimento. Inicialmente, foram

avaliadas em laboratório misturas recicladas contendo baixos teores (10%, 20%, 25%) e altos teores (35%, 50% e 65%) de RAP, sem adição de agente rejuvenescedor (AR). Numa segunda etapa foram avaliadas misturas contendo 25% e 50% de RAP, com uso de AR de base vegetal. Os resultados indicaram que as misturas contendo altos teores de RAP apresentaram melhor resistência à deformação permanente e comportamento satisfatório em relação à fadiga. Os autores observaram ainda que o uso de AR melhorou o comportamento das misturas testadas quanto à fadiga.

Nessa perspectiva, o objetivo do presente estudo é avaliar preliminarmente a influência da idade de diferentes tipos de material fresado, oriundos de rodovias do estado da Bahia, no teor de projeto de misturas asfálticas recicladas, dosadas em laboratório, com elevados percentuais de RAP.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho experimental teve início com a coleta do material fresado (RAP) em cada uma das rodovias do estado da Bahia contempladas no presente estudo, sendo duas delas rodovias Federais, BR-324 (km 540) e BR-101 (km 505,6), além da rodovia estadual BA-093 (km 37). As amostras foram levadas para o Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), onde deu-se início aos ensaios de caracterização.

Os revestimentos das rodovias BR-324 e a BA-093, usinados à quente, do tipo concreto asfáltico (CA), quando coletados, apresentavam cerca de 10 anos pós execução, com espessura média de corte na operação de fresagem de 5,0 cm. Na BR-101, o revestimento, também em CA, havia sido executado há cerca de dois anos. O motivo para a fresagem precoce no segmento onde coletou-se a amostra foi justificado pela ocorrência de trilhas de roda e exudação excessivas, devido a instalação de ondulação transversal (“quebra molas”) no local, as quais estavam comprometendo a trafegabilidade e, por isso, a espessura fresada para regularização foi da ordem de 2,0 cm. A pequena espessura fresada na BR-101, aliada a ocorrência de exudação no local, justificam o elevado teor de CAP presente neste RAP, conforme será observado mais adiante (Tabela 2).

Para confecção dos projetos das misturas asfálticas recicladas, sem uso de agente rejuvenescedor, foram adquiridos 50 kg de brita 5/8” e 50 kg de brita 3/4”, ambas da pedreira Pedra do Cavalo, situada no município de Muritiba/BA, além de 20 litros de CAP 50/70, cedidos pela Empresa Brasquímica Produtos Asfálticos Ltda.

2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS FRESADOS E AGREGADOS VIRGENS

As amostras de RAP foram coletadas imediatamente após os serviços de fresagem à frio, armazenados em sacos de 50 kg (cerca de 100 kg por rodovia) e transportados para o laboratório. No processo de quarteamento percebeu-se a presença de grumos no material fresado, sendo que na BR-324 a presença foi mais acentuada. As amostras de RAP foram quarteadas utilizando-se o quarteador de abertura 3/4”, sendo que o material passante foi o utilizado no presente estudo. No presente estudo, executado no ano de 2016, os materiais fresados foram caracterizados com base na ES DNIT 33 (DNIT, 2005), contemplando a extração do ligante asfáltico residual, via Rotarex, método de ensaio ME DNER 53 (DNER, 1994b), análise granulométrica do agregado oriundo da extração, ME DNER 83 (DNER, 1998b), densidade real e absorção do agregado graúdo, ME DNER 81 (DNER, 1998a) e densidade real do agregado

miúdo, ME DNER 84 (DNER, 1998c). Na Tabela 1 são apresentados os teores de CAP determinados e nas Tabelas 2 e 3 as características dos agregados obtidos após extração com o Rotarex de cada amostra de RAP.

Tabela 1 – Teores de CAP dos materiais fresados

Método de ensaio	Teor de CAP BR-324/BA (%)	Teor de CAP BA-093/BA (%)	Teor de CAP BR-101/BA (%)
(ME) DNER 53 Rotarex	5,53	5,65	7,57

Fonte: Elaboração própria

Os agregados virgens adquiridos para comporem os projetos das misturas junto com o RAP, foram submetidos aos ensaios de análise granulométrica, ME DNER 83 (DNER, 1998b), além de densidade e absorção, ME DNER 81 (DNER, 1998a). As granulometrias dos dois agregados virgens também estão apresentadas na Tabela 2 e suas demais características, como densidade aparente (Dap), densidade real (Dreal), absorção (Abs) e abrasão Los Angeles (Abrasão LA), encontram-se na Tabela 3.

Tabela 2 – Granulometrias dos agregados do fresado e agregados virgens

Peneiras		BR-324	BA-093	BR-101	Brita 5/8”	Brita 3/4”
Nome	Abertura (mm)	% passante	% passante	% passante	% passante	% passante
2"	50,8	100	100	100	100	100
1 1/2"	38,1	100	100	100	100	100
1"	25,4	100	100	100	100	100
3/4"	19,1	100	100	100	100	99,80
1/2"	12,7	97,15	97,07	98,84	71,28	10,64
3/8"	9,5	92,75	93,63	97,21	33,65	3,29
#4	4,8	75,14	73,56	80,74	0,93	1,20
#10	2,0	54,93	55,92	61,17	0,67	0,94
#40	0,42	29,03	31,59	34,61	0,62	0,74
#80	0,175	16,70	19,10	23,44	0,59	0,60
#200	0,075	8,79	10,08	13,67	0,50	0,44

Fonte: Elaboração própria

Tabela 3 – Caracterização dos agregados

Ensaio	BR-324		BA-093		BR-101		Brita 5/8”	Brita 3/4”
	Graúdo	Miúdo	Graúdo	Miúdo	Graúdo	Miúdo		
D_{ap} (g/cm^3)	2,73	-	2,74	-	2,62	-	2,76	2,76
D_{real} (g/cm^3)	2,79	2,73	2,78	2,75	2,67	2,71	2,79	2,79
Abs (%)	0,80	-	0,76	-	0,58	-	0,38	0,43
Abrasão LA	-	-	-	-	-	-	16,70	17,04

Fonte: Elaboração própria

2.2 CARACTERIZAÇÃO DO CAP NOVO

O CAP 50/70 novo foi caracterizado por meio dos ensaios de Penetração, ME DNIT 155 (DNIT, 2010b), Viscosidade Saybolt-Furol, ME DNER 4 (DNER, 1994a), Ponto de Fulgor, ME DNER 148 (DNER, 1994d), e ponto de amolecimento, ME

DNIT 131 (DNIT, 2010a). A densidade do CAP 50/70 foi considerada igual a 1,03 g/cm^3, conforme caracterização encaminhada pelo fornecedor do ligante. Os dados de caracterização do ligante asfáltico utilizado nos projetos das misturas estão apresentados, de acordo com a especificação de material EM DNIT 95 (DNIT 2006b), na Tabela 4. Com os dados de viscosidade obtidos nas temperaturas de 135 ºC, 150 ºC e 177 ºC e atendendo os limites de viscosidade estabelecidos pelo ME DNER 43 (DNER, 1995), foram determinadas as temperaturas para a mistura e compactação do concreto asfáltico reciclado (Figura 2). A faixa de temperatura do CAP novo para preparação de cada mistura variou entre 149,9 ºC e 156,5 ºC, enquanto para compactação a temperatura ficou compreendida entre 131,6 ºC e 140,4 ºC.

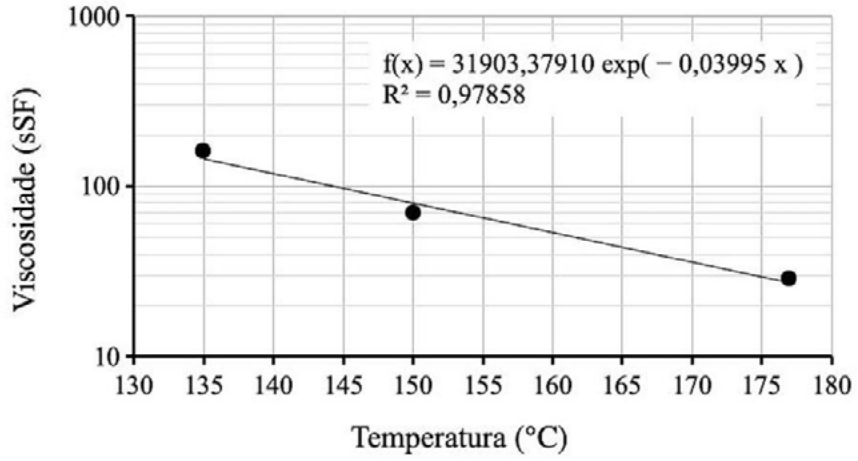
Cabe reiterar que não foi utilizado agente rejuvenescedor no presente estudo, motivo pelo qual escolheu-se o CAP 50/70 novo de um lote que apresentou a menor consistência possível, da mesma forma que Izaks *et al.* (2015), conforme os valores medidos de penetração, viscosidade e ponto de amolecimento, com destaque para este último que, conforme a Tabela 4, ficou abaixo do valor mínimo estabelecido na especificação EM DNIT 95 (DNIT, 2006b).

Tabela 4 – Caracterização do CAP novo (Araújo *et al.*, 2021)

ENSIAO		ESPECIFICAÇÃO DNIT-EM 95/2006	RESULTADO	MÉTODO DE ENSAIO
Penetração a 25 ºC (0,1 mm)		50 - 70	70	DNIT-ME 155/2010
Viscosidade Saybolt-Furol (s)	135 ºC	Min. 141	159	DNER-ME 4/1994
	150 ºC	Min. 50	69	
	177 ºC	30 - 150	28,5	
Ponto de Fulgor (ºC)		Min. 235	335	DNER-ME 148/1994
Ponto de amolecimento (ºC)		Min. 46	39,5	DNIT-ME 131/2010

Fonte: Elaboração própria

Figura 2 – Curva viscosidade x temperatura do CAP novo



Fonte: Elaboração própria

2.3 DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS

O manual de restauração de pavimentos asfálticos (DNIT, 2006c) estabelece que na dosagem da mistura reciclada a quente, quando for necessária uma correção granulométrica do RAP, deverá ser determinada a quantidade e qualidade dos agregados ou da mistura a ser adicionada, de maneira a satisfazer da melhor forma a faixa granulométrica específica adotada. Simultaneamente, deverá ser analisada a necessidade de utilização do CAP adicional.

Dessa forma, conhecendo-se a curva granulométrica dos agregados de cada RAP e dos agregados virgens (Tabela 2), definiu-se de forma interativa as porcentagens, em massa, de cada material para a dosagem das misturas recicladas. O critério utilizado para tal estabeleceu que o acréscimo dos agregados fosse realizado de forma que houvesse o melhor enquadramento possível na faixa C da especificação de Serviço ES DNIT 33 (DNIT, 2005), com o maior teor possível de fresado. As quantidades de brita 5/8", brita 3/4" e RAP que melhor se ajustaram em cada dosagem, estão apresentadas na Tabela 5. Como os percentuais de agregados virgens e RAP determinados servirão como ponto de partida para a dosagem das misturas recicladas, também estão apresentados na Tabela 5 os teores de CAP residual resultantes de cada uma destas composições, calculados com base nos valores de extração de ligante dos materiais fresados, apresentados na Tabela 1, e a participação de cada agregado virgem, para os três materiais fresados testados.

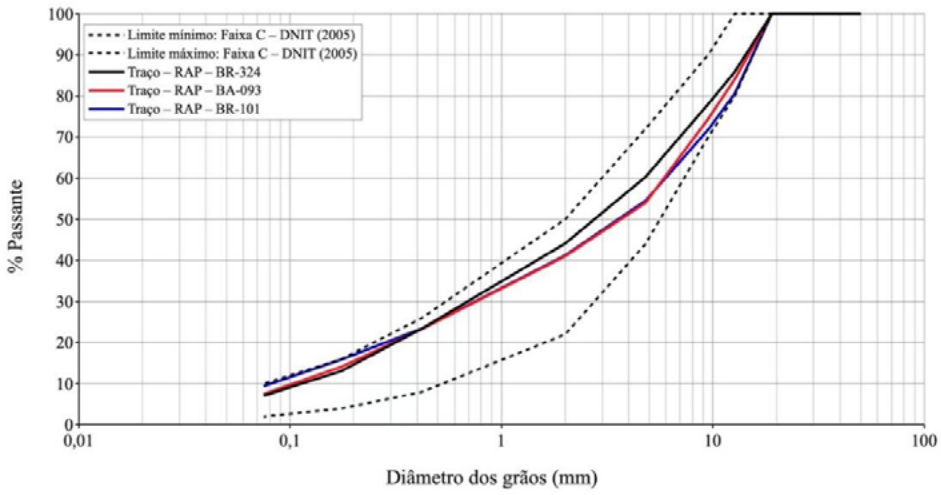
Tabela 5 – Granulometria das misturas asfálticas recicladas e CAP resultante

ORIGEM	BRITA 5/8" (%)	BRITA ¾" (%)	RAP (%)	CAP RESULTANTE (%)
BR-324	10	10	80	4,47
BA-093	17	10	73	4,19
BR-101	18	15	67	5,20

Fonte: Elaboração própria

As granulometrias de cada projeto de mistura reciclada da Tabela 5, devidamente enquadradas nos limites estabelecidos pela faixa C da ES DNIT 33 (DNIT, 2005), estão reunidas na Figura 3

Figura 3 – Granulometrias das misturas recicladas



Fonte: Elaboração própria

Os teores de CAP utilizados nas dosagens das misturas recicladas (soma do CAP envelhecido do RAP e CAP 50/70 novo) variaram de acordo com as características de cada tipo de RAP. Inicialmente todos os traços receberam adição de CAP até o limite de 2,5%. Entretanto, com o objetivo de analisar o comportamento das misturas constituídas pelos materiais fresados mais antigos (BR-324 e BA-093), optou-se que para a mistura com o RAP da BR-324 a quantidade adicional de CAP novo seria maior, ficando próximo de 3%. Para cada traço foram moldados, de início, corpos de provas (CP) sem adição de CAP novo, ou seja, apenas com o teor de ligante residual originalmente presente em cada RAP (Tabela 5), para servir como uma espécie de balizador para avaliação das variações das propriedades mecânicas e volumétricas das amostras testadas com teores crescentes de CAP novo.

Na Tabela 6 encontra-se o detalhamento da quantidade dos materiais utilizados para confecção dos CP de 1200 g cada, para os diferentes teores de ligante asfáltico que foram testados, baseado nos traços determinados anteriormente (Tabela 5).

De acordo com o método de ensaio Marshall ME DNER 43 (DNER, 1995), para cada teor de ligante foram moldados três corpos de prova. O objetivo deste ensaio foi determinar o teor de CAP total de projeto que representasse o melhor comportamento quanto a resistência à compressão (estabilidade), fluência, volume de vazios (Vv) e relação betume/vazios (RBV), de forma a atender aos limites estabelecidos pela ES DNIT 33 (DNIT, 2005). Essa preparação resultou em 18 CP para a mistura com o RAP da BA-093, 18 CP para a a mistura com RAP da BR-101 e 24 CP para a mistura com RAP da BR-324.

Os materiais foram aquecidos, conforme temperaturas definidas pela curva de viscosidade elaborada (Figura 2). O RAP foi pré-aquecido em estufa a 120 ºC para retirada dos grumos remanescentes e depois foi quarteado para obtenção da quantidade necessária para cada teor. Em seguida, o fresado foi aquecido na mesma faixa de temperatura definida para o CAP 50/70 novo (Figura 2) e os agregados virgens foram aquecidos a temperatura de 12,5 ºC acima da temperatura do CAP, aproximadamente, conforme estabelece o método ME DNER 43 (DNER, 1995). Após atingirem as devidas temperaturas, cada material foi levado ao tacho de mistura, sendo que o CAP novo foi adicionado por último sobre os agregados e RAP. A temperatura final de cada mistura ficou por volta de 150 ºC e a temperatura de compactação em torno de 138 ºC. A compactação da mistura foi realizada com 75 golpes do soquete Marshall em cada face do corpo de prova.

Após a compactação os moldes foram colocados em uma superfície lisa e permaneceram em repouso por cerca de 14 horas para depois serem desmoldados. Após extração foram coletadas quatro medidas de altura dos CP em posições diametralmente opostas. Os CP foram pesados ao ar e posteriormente pesados imersos em um recipiente com água, conforme o ME DNER 117 (DNER, 1994c). Em seguida as amostras foram imersas em banho-maria a (60 ± 1 ºC) por um período de 30 a 40 minutos. Por fim, um a um, os CP foram rompidos na prensa Marshall para determinação dos valores de estabilidade e fluência. O critério adotado para definição do teor de ligante de projeto considerou o menor teor entre aqueles que atenderam a todos os parâmetros volumétricos, de resistência e deformabilidade, preconizados pela ES DNIT 33 (DNIT, 2005) e analisados no presente estudo.

Tabela 6 – Detalhamento da dosagem das misturas reciclada testadas

ORIGEM DO RAP	BRITA 5/8"	BRITA 3/4"	RAP			CAP NOVO		CAP TOTAL
	(g)	(g)	Agregado (g)	CAP (g)	CAP (%)	(g)	(%)	(%)
BR-324	114,63	114,63	917,04	53,68	4,47	0,00	0,00	4,47
	114,24	114,24	914,29	53,53	4,46	3,59	0,30	4,76
	113,76	113,76	909,00	53,27	4,44	9,25	0,77	5,21
	113,21	113,21	905,66	53,01	4,42	14,91	1,24	5,66
	112,68	112,68	901,41	52,77	4,40	20,47	1,71	6,10
	112,15	112,15	897,20	52,51	4,38	25,99	2,17	6,54
	111,63	111,63	893,02	52,28	4,36	31,45	2,62	6,98
	111,11	111,11	888,89	52,03	4,34	36,86	3,07	7,41
BA-093	195,46	114,97	839,31	50,26	4,19	0,00	0,00	4,19
	194,29	114,29	834,29	49,96	4,16	7,18	0,60	4,76
	193,36	113,74	830,33	49,72	4,14	12,84	1,07	5,21
	192,45	113,21	826,42	49,49	4,12	18,44	1,54	5,66
	191,55	112,68	822,54	49,26	4,10	23,98	2,00	6,10
	190,65	112,15	818,69	49,03	4,09	29,48	2,46	6,54
BR-101	204,76	170,60	762,18	62,42	5,20	0,00	0,00	5,20
	203,77	169,81	758,49	62,12	5,18	5,80	0,48	5,66
	202,82	169,01	754,93	61,83	5,15	11,41	0,95	6,10
	201,87	168,22	751,40	61,54	5,13	16,96	1,41	6,54
	200,93	167,44	747,91	61,25	5,10	22,47	1,87	6,98
	200,00	166,67	744,44	60,97	5,08	27,92	2,33	7,41

Fonte: Elaboração própria

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

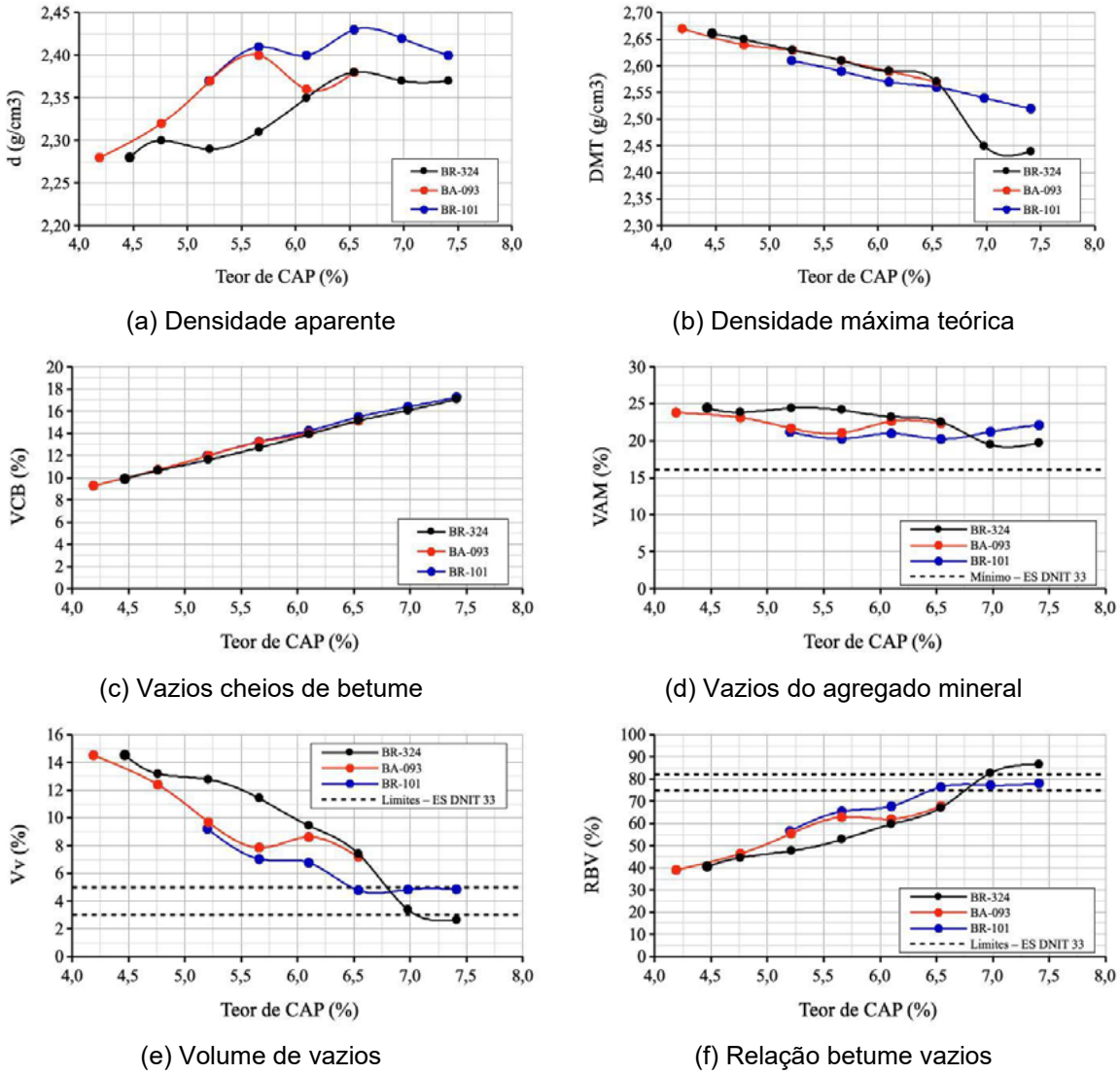
3.1 CARACTERÍSTICAS VOLUMÉTRICAS DE CADA TRAÇO PROJETADO

Para facilitar a análise dos dados da dosagem das misturas recicladas, apresenta-se na Figura 4 os resultados de densidade aparente (d), densidade máxima teórica (DMT), volume de vazios (Vv), vazios cheios de betume (VCB), vazios do agregado mineral (VAM) e relação betume vazios (RBV), referentes às misturas recicladas dosadas.

Os resultados da Figura 4 demonstram que os valores da densidade aparente das três misturas crescem com o aumento do teor de CAP total até o atingimento de seu valor máximo para os teores de 6,54%, 5,66% e 6,54%, para BR-324, BA-093 e BR-101, correspondendo a 2,17%, 1,54% e 1,41% de adição de CAP novo, respectivamente (Tabela 6).

Quanto a densidade máxima teórica (DMT) ocorre o inverso, ou seja, há uma queda contínua deste parâmetro com o aumento do teor de CAP, pois, por ser este o de menor densidade real entre os materiais constituintes das misturas asfálticas, seu acréscimo implica na redução relativa dos demais componentes, culminando na redução da DMT. Em relação aos valores de VCB e VAM, calculados com base em cada mistura produzida para determinação do Vv e RBV, apresentam comportamentos distintos, sendo que enquanto o primeiro apresenta valores praticamente coincidentes para as três misturas testadas e cresce continuamente com o aumento do teor de CAP, o segundo apresenta diferenças entre as misturas e sua variação tende a pequena queda com aumento do teor de ligante. Finalmente, os resultados de Vv e RBV, que são fisicamente correlacionados, apresentam comportamentos previsivelmente antagônicos, onde Vv decresce com o aumento do teor de CAP e, consequentemente, RBV aumenta com o aumento da quantidade de ligante na mistura. Portanto, à medida que o teor de CAP foi aumentando nas misturas recicladas o Vv foi diminuindo e, consequentemente, o RBV foi crescendo.

Figura 4 – Parâmetros volumétricos das misturas asfálticas recicladas



(a) Densidade aparente

(b) Densidade máxima teórica

(c) Vazios cheios de betume

(d) Vazios do agregado mineral

(e) Volume de vazios

(f) Relação betume vazios

Fonte: Elaboração própria

Na Figura 4 (e) e (f) encontram-se sinalizados os limites de Vv e RBV estabelecidos pela ES DNIT 33 (DNIT, 2005), de 3% a 5% e 75% a 82%, respectivamente, para misturas recicladas a quente. Com base nisso, é possível verificar que a mistura com RAP da BR-324 somente apresentou resultado compatível de Vv para o teor de 6,98% de CAP total (adição de 2,62% de CAP novo). Entretanto, nesse teor o RBV foi de 82,77, ou seja, acima do limite máximo estabelecido. Contudo, a mesma norma define que caso o RBV não seja atingido, basta que a mistura atenda ao limite mínimo de VAM de 16%, sinalizado na Figura 4 (d), para que atenda a esse critério. Para a mistura com RAP da BA-093, cujo resíduo é de mesma idade que o da BR-324, com os teores testados de CAP total e CAP novo adicionado, não foi possível atingir as exigências da referida norma para Vv, demonstrando, conforme comprovado com o RAP da BR-324, da necessidade de utilização de teores maiores de CAP novo na mistura.

Quanto a mistura com o RAP da BR-101, sendo este o mais novo dentre os três resíduos analisados, as exigências da ES DNIT 33 (DNIT, 2005) foram atendidas com menor percentual de CAP total (6,54%) e de CAP novo (1,44%). Vale destacar que nesse CAP total tem-se 5,10% de

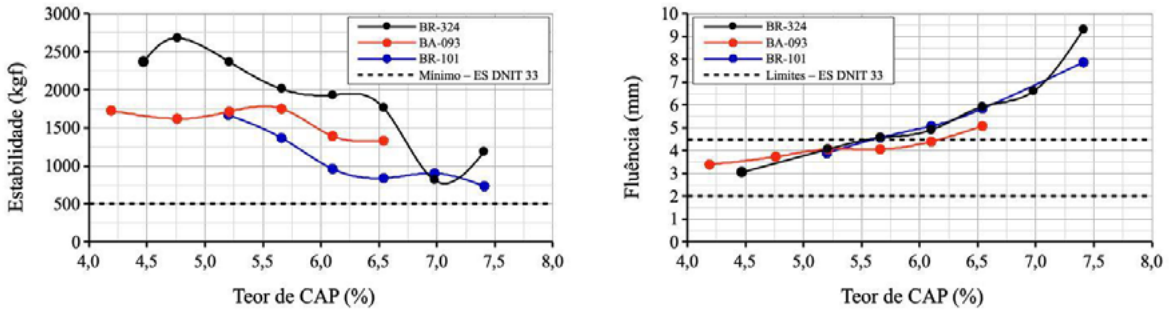
ligante do RAP que quando comparado ao RAP da BR-324, esse teor é 17% maior. Mesmo considerando-se essa diferença, a demanda por CAP novo da mistura com o RAP da BR-324 é 31% maior, demonstrando haver relação entre a idade do RAP e a demanda por ligante novo para viabilizar a mistura com o ligante envelhecido. É interessante ainda observar que o comportamento das misturas recicladas com diferentes teores de CAP apresentou variação não linear dos parâmetros avaliados. Tal fato pode estar relacionado com o processo de interação entre o CAP residual do RAP com o CAP novo adicionado, descrita por GASPAR *et al*. (2020).

3.2 ESTABILIDADE E FLUÊNCIA MARSHALL

Na Figura 5 são apresentados os resultados de estabilidade e fluência Marshall para os diferentes teores testados de CAP total das misturas recicladas. Os resultados de estabilidade demonstram uma maior rigidez para baixos teores de CAP das misturas com RAP mais antigos (BR-324 e BA-093), em comparação aos resultados da mistura com o RAP da BR-101, o mais novo entre os três testados. Os valores de rigidez das misturas recicladas se justificam pela presença predominante do CAP do RAP para os menores teores testados, que determina o comportamento da mistura pela sua excessiva rigidez provocada pelo seu envelhecimento. Prova disso é que as misturas testadas sem acréscimo de CAP novo foram as que apresentaram maiores valores de estabilidade e menores valores de deformação (fluência) nas três misturas estudadas.

Do ponto de vista de atendimento da ES DNIT 33 (DNIT, 2005), cuja exigência de estabilidade mínima é de 500 kgf, conforme linha tracejada da Figura 5 (a), todas as misturas atenderam a esse parâmetro. Quanto a fluência esse parâmetro é utilizado atualmente apenas para avaliar a tendência de deformação de misturas asfálticas, não existindo mais, entretanto, exigência desse parâmetro em norma para aprovação de projeto de traço de misturas asfálticas. Na Figura 5 é possível observar o potencial das misturas recicladas, em termos de comportamento mecânico, conforme constatado por Lizárraga *et al*. (2018), Bolina da Cunha *et al*. (2018) e Unger Filho *et al*. (2020).

Figura 5 – Estabilidade e fluência Marshall das misturas recicladas



(a) Estabilidade (b) Fluência

Fonte: Elaboração própria

3.3 TEORES PROMISSORES DAS MISTURAS RECICLADAS

Dentre todos os teores avaliados das três misturas recicladas projetadas, apresentados nas Figuras 4 e 5, estão reunidos na Tabela 7 aqueles teores de CAP total de cada mistura que apresentaram os resultados mais promissores de volume de vazios (Vv), vazios do agregado mineral (VAM), relação betume vazios (RBV), estabilidade e fluência, além dos limites

estabelecidos pela ES DNIT 33 (DNIT, 2005). Dos resultados apresentados na Tabela 7, observa-se que dentre as exigências da ES DNIT 33 (DNIT, 2005) para a mistura contendo o RAP da BR-324 apenas relação betume vazios (RBV) ficou ligeiramente acima do limite máximo exigido pela referida norma. Para o traço com RAP da BA-093, entretanto, além da RBV o volume de vazios também ficou fora dos limites estabelecidos. Como estes dois materiais fresados tem em comum a elevada idade (10 anos, aproximadamente) e o elevado percentual de participação na mistura reciclada (acima de 70%), a estratégia adotada de utilização de um teor maior de CAP novo na mistura com o RAP da BR-324 (3%) apontou uma tendência de maior demanda de ligante novo por esta mistura com RAP mais antigo. As dosagens realizadas com estes dois fresados (BR-324 e BA-093) demonstraram a dificuldade de dosar misturas com RAP mais antigo, sem uso de agente rejuvenescedor, onde ambos apresentaram comportamentos similares até a adição de 2,5% de CAP novo, aproximadamente, onde somente foi possível melhorar a performance da mistura contendo RAP da BR-324 com o aumento do CAP novo para algo em torno de 3% (6,98% de CAP total).

Tabela 7 – Parâmetros das misturas recicladas nos teores considerados promissores

Origem do RAP	Teor de CAP total (%)	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)	Estabilidade (kgf)	Fluência (mm)
BR-324	6,98	3,38	19,44	82,77	810,60	6,60
BA-093	6,54	7,19	22,34	67,88	1331,73	5,08
BR-101	6,54	4,78	20,24	76,42	837,38	5,84
ES DNIT 33	4,5 a 9,0	3 a 5	Min. 15	75 a 82	Min. 500	-

Fonte: ES DNIT 33 (DNIT, 2005)

Por fim, para a mistura com RAP da BR-101 os resultados com 6,54% de CAP total possibilitaram o atendimento de todas exigências da ES DNIT 33 (DNIT, 2005). Com isso, dois aspectos carecem de destaque nestes resultados obtidos: O primeiro deles, já mencionado anteriormente, está relacionado a idade do RAP e, consequentemente, o nível de envelhecimento do CAP residual presente no RAP; O segundo aspecto, não menos importante para misturas sem uso de agente rejuvenescedor, é a quantidade de RAP a ser utilizado em misturas recicladas à quente. Os resultados obtidos com os três materiais fresados do presente estudo apontam que a utilização de elevados teores de RAP em misturas recicladas, sem uso de agente rejuvenescedor, não é uma tarefa trivial, conforme constatado por Suzuki *et al.* (2023).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A avaliação do uso de materiais fresados de diferentes origens em misturas asfálticas recicladas demonstrou que a idade do resíduo influencia na dosagem e, principalmente, no consumo de CAP novo para viabilização da mistura para utilização como camada de revestimento de rodovias de tráfego pesado (N > 5 x 106). Para materiais fresados mais antigos o uso de agentes rejuvenescedores pode ser uma alternativa interessante na medida em que esse aditivo desempenhará o papel de rejuvenescer o ligante envelhecido do RAP, minimizando a necessidade de CAP novo. Por outro lado, a mistura com o RAP da BR-101 mostrou que a juventude do ligante residual contribuiu para que essa mistura apresentasse o melhor desempenho entre as três misturas testadas e com baixa demanda por CAP novo. Por fim, cabe destacar que a

técnica da reciclagem a quente, utilizando resíduo de mistura asfáltica envelhecida, já é uma realidade, proporcionando atualmente ganhos financeiros e ambientais expressivos, principalmente nos trechos de rodovias sob concessão.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA-COSTA, A., BENTA, A. **Economic and environmental impact study of warm mix asphalt compared to hot mix asphalt**. Journal of Cleaner Production, vol. 112, p. 2308-2317, jan. 2016. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.077

BOLINA DA CUNHA, C., BUDNY, J., KLAMT, R. A., CENTOFANTE, R., BARONI, M. **Avaliação de concreto asfáltico usinado a quente com incorporação de material fresado**. Revista Matéria, vol. 23, n. 3, 2018. https://doi.org/10.1590/S1517-707620180003.0520

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES (CNT). **Anuário CNT do Transporte 2022**. Disponível em: http://anuariodotransporte.cnt.org.br/2022/inicial. Acesso em: 14 abr. 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 4 - Material betuminoso – determinação da viscosidade Saybolt-Furol a alta temperatura método da película delgada**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1994a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 43: Mistura betuminosa a quente – Ensaio Marshall**, RJ, Brasil, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 53: Mistura betuminosa – porcentagem de betume**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1994b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER–ME 81: Agregados – Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1998a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER–ME 83: Agregados – Análise granulométrica**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1998b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER–ME 84: Agregado miúdo – determinação da densidade real**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1998c.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 117: Mistura betuminosa – determinação da densidade aparente**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1994c.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 148: Material betuminoso – determinação dos pontos de fulgor e de combustão (vaso aberto Cleveland)**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1994d.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ES 33: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico reciclado a quente na usina**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ES 95: Cimentos asfálticos de petróleo**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ME 131: Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ME 155: Material asfáltico – Determinação da penetração**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **IPR – 720: Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. Rio de Janeiro. 310 p. 2006c.

GASPAR, M. S., VASCONCELOS, K. L., LOPES, M. M., BERNUCCI, L. L. B. **Evaluation of binder blending on warm mix asphalt recycling**. Revista Transportes, vol. 28, n. 2, p. 87–99, mai. 2020. https://doi.org/10.14295/transportes. v28i2.2133.

IZAKS, R., HARITONOVS, V., KLASA, I., ZAUMANIS, M. **Hot Mix Asphalt With High RAP Content**. Procedia Engineering, vol. 114, p. 676-684, 2015. https://doi.org/10. 1016/ j.proeng.2015.08.009.

LIZÁRRAGA, J. M., RAMÍREZ, A., DÍAZ, P., MARCOBAL, J. R., GALLEGO, J. **Short-term performance appraisal of half-warm mix asphalt mixtures containing high (70%) and total RAP contents (100%): From laboratory mix design to its full-scale implementation**. Construction and Building Materials, vol. 170, p. 433–445, mai. 2018. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.051

MOGHADDAM, T. B., BAAJ, H. **The use of rejuvenating agents in production of recycled hot mix asphalt: A systematic review**. Construction and Building Materials, vol. 114, p. 805–816, jul. 2016. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.015

RAPOSEIRAS, A., MOVILLA, D., VARGAS, A., BILBAO, R., CIFUENTES, C. **Technological, environmental and economic aspects of Asphalt recycling for road construction evaluation of Marshall stiffness, indirect tensile stress and resilient modulus in asphalt mixes with reclaimed asphalt pavement and copper slag**. Renewable and Sustainable Energy Review Revista Ingeniería de Construcción, vol. 32, n. 1, p. 15–24, abr. 2017. https://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732017000100002

SEGUNDO, I. G. R., BRANCO, V. T. F. C., VASCONCELOS, K. L., HOLANDA, A. S. **Misturas asfálticas recicladas a quente com incorporação de elevado percentual de fresado como alternativa para camada de módulo elevado**. Revista Transportes, vol. 24, n. 4, p. 85-94, dez. 2016. https://doi.org/10.14295/ transportes. v24i4.1148

SUZUKI, K., VASCCONCELOS, K., KLINSKY, L. M., BESSA, I. **Evaluation of recycled asphalt mixtures with different RAP contents and the effect of recycling agent**. Road Materials and Pavement Design, vol.ahead-of-print, p. 1-13, 2023. https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2191739

UNGER FILHO, W., KLINSKY, L. M. G., MOTTA, R., BERNUCCI, L. L. B. **Cold Recycled Asphalt Mixture using 100% RAP with Emulsified Asphalt-Recycling Agent as a New Pavement Base Course.** Advances in Materials Science and Engineering, vol. 2020, p. 1-12, abr. 2020. https://doi.org/10.1155/2020/5863458

XIE, Z., ASCE, S. M., TRAN, N., JULIAN, G., TAYLOR, A., BLACKBURN, L. D. **Performance of Asphalt Mixtures with High Recycled Contents Using Rejuvenators and Warm-Mix Additive: Field and Lab Experiments**. Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 29, n. 10, out. 2017. https://ascelibrary.org/doi/abs/ 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002037