

AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE MISTURA ASFÁLTICA RECICLADA EM CAMADA POROSA DE ATRITO

Carla Marília Cavalcante Alecrim

Renan Santos Maia

Verônica Teixeira Franco Castelo Branco

Universidade Federal do Ceará

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes - PETRAN

RESUMO

Diversas são as utilizações de misturas asfálticas recicladas (do inglês, *Reclaimed Asphalt ou RA*) em camadas de revestimento, dentre elas os asfaltos porosos. No Brasil, o RA não vem sendo utilizado para este fim, embora seja importante estudar essa aplicação para ampliarem-se as possibilidades de utilização deste material. Assim sendo, este trabalho tem como objetivo principal investigar o comportamento de uma mistura do tipo Camada Porosa de Atrito (CPA) com adição 15% de RA, sob o ponto de vista dos requisitos previstos na norma brasileira. Os métodos de compactação Marshall e giratório para esse tipo de mistura também foram comparados neste estudo. Concluiu-se que a adição de RA não prejudicou o comportamento se comparado ao da mistura de referência, embora ambas não tenham satisfeito a todos os requisitos previstos em norma. A compactação giratória, porém, produziu misturas com melhores propriedades se comparada a compactação Marshall, mantendo-se a volumetria das misturas.

ABSTRACT

Reclaimed asphalt (RA) can be used in several types of wearing courses, including porous asphalts. In Brazil, RA has not been used for this purpose, although it is important to study this application in order to increase the possibilities of using this material. Therefore, the main objective of the present work is to investigate the performance of a Porous Friction Course (PFC) with the addition of 15% of RA, from the standpoint of the requirements of the Brazilian specification. Marshall and gyratory compaction methods are also compared in this study. It was concluded that the addition of RA did not led to worse performance compared to that of the reference mixture, although both mixtures did not meet all the requirements of the Brazilian specification. The gyratory compaction led to better performances of the recycled mixture while the air voids content was maintained.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As misturas asfálticas porosas são materiais usados em camadas de revestimento colocadas acima de estruturas regulares de pavimentos com o objetivo de melhorar as condições de segurança do tráfego – aumento da aderência pneu-pavimento e a drenagem da água superficial - durante eventos de chuva e reduzir o ruído ao rolamento. No Brasil, este tipo de mistura é conhecido como Camada Porosa de Atrito (CPA) e é utilizado principalmente, assim como em outros países, em rodovias de alto volume de tráfego. No entanto, as misturas porosas têm potencial enquanto alternativa para melhorar a sustentabilidade de pavimentos em ambientes urbanos. No que se refere à sustentabilidade, é cada vez mais comum pesquisadores proporem a combinação de duas ou mais técnicas sustentáveis, como misturas mornas, asfalto poroso e misturas asfalto reciclado (RA, do inglês, *Reclaimed Asphalt*) – ou fresado, visando obter, simultaneamente, melhoras nos aspectos ambiental, social e econômico dos serviços de pavimentação.

No que se refere ao uso de RA em misturas porosas (que normalmente requerem Asfalto Modificado por Polímero, AMP), alguns estudos já foram realizados e mostraram comportamento satisfatório, mas especificações técnicas adotadas em muitos países ainda não permitem a utilização de quaisquer materiais reciclados nesse tipo de mistura. Por este motivo, Frigio *et al.* (2015) ressaltam a necessidade de desenvolver técnicas confiáveis que permitam o uso de RA em novas misturas porosas. Não foram encontrados relatos de tal aplicação de RA no Brasil, mas é comum encontrar na literatura trabalhos que tratam da utilização de RA advindos de camadas de asfalto poroso antigas em novas camadas de asfalto poroso. No entanto,

em alguns lugares, especialmente em centros urbanos onde a utilização de CPA é recente, este tipo de revestimento ainda não atingiu o fim da sua vida útil e, portanto, nesses casos este material ainda não está disponível para reutilização. Assim, o presente trabalho propõe a investigação em laboratório da utilização de RA, em baixo teor, advindo de revestimentos cujo ligante não contém polímero, disponíveis em maior quantidade na cidade onde a pesquisa está sendo desenvolvida, em novas CPAs.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A norma brasileira para a CPA é a ES 386 (DNER, 1999). Essa especificação determina os valores que o Volume de Vazios (Vv) pode assumir, propõe cinco faixas de distribuição granulométrica permitidas, além de determinar a espessura do revestimento e os limites de teor de ligante. Os requisitos de propriedades mecânicas são estabelecidos nesta norma por meio da resistência ao desgaste Cântabro e da resistência à tração por compressão diametral (RT). O resumo desses requisitos é encontrado na Tabela 1.

Tabela 1: Resumo de características a serem atingidas por mistura asfáltica utilizada como CPA (Fonte: Adaptada de Bernucci *et al.*, 2010)

Peneira de Malha Quadrada		Faixas					Tolerância
ABNT	Abertura (mm)	Porcentagem Passante em Massa					
		I	II	III	IV	V	
3/4"	19	-	-	-	-	100	-
1/2"	12,5	100	100	100	100	70-100	±7
3/8"	9,5	80-100	70-100	80-90	70-90	50-80	±7
Nº 4	4,8	20-40	20-40	40-50	15-30	18-30	±5
Nº 10	2	12-20	5-20	10-18	10-22	10-22	±5
Nº 40	0,42	8-14	-	6-12	6-13	6-13	±5
Nº 80	0,18	-	2-8	-	-	-	±3
Nº 200	0,075	3-5	0-4	3-6	3-6	3-6	±2
AMP (%)				4-6			±0,3
Espessura da Camada (cm)		3,0		Menor ou Igual a 4,0			
Vv (%)				18-25			
Desgaste Cântabro (%)				25			Não se aplica
Resistência à Tração por Compressão Diametral (MPa)			Mínimo de 0,55				

Os impactos ambientais causados pelos setores de produção têm preocupado os diversos ramos da indústria. Na pavimentação, essa preocupação se dá, também, no esgotamento dos recursos naturais e na destinação dos resíduos gerados por essa atividade. A reciclagem de misturas asfálticas permite redução de custos e de impactos ambientais, já que o RA contém ligante, que é o insumo mais nobre da pavimentação, e agregados (Kennedy, 1998; Al-Qadi, 2007; Barco Carrión, 2015). Além disso, pode oferecer benefícios técnicos, como mostrado por diversos trabalhos que constataram que o uso deste material em misturas novas resultou em comportamento similar ou até mesmo superior ao de misturas produzidas exclusivamente com insumos virgens. O RA pode ser utilizado em diferentes tipos de mistura asfáltica, como nas misturas a quente (Copeland, 2011), misturas mornas (Mallick *et al.*, 2008) e misturas porosas (Kanou *et al.*, 2010), que também podem ser quentes ou mornas.

Devido à ampla utilização de camadas porosas de asfalto em alguns países, a citar, Japão e Itália, surgiu a necessidade de reutilização de RA de velhos revestimentos deste tipo em novos. Resultados preliminares obtidos por estudo conduzido por Kanou *et al.* (2010) indicam que novas misturas porosas contendo até 30% de RA com AMP têm durabilidade equivalente a misturas porosas virgens. Outros trabalhos também propuseram a incorporação de RA advindo de misturas porosas em novas misturas porosas (Praticò *et al.*, 2012a, 2012b; Frigio *et al.*, 2013, 2015). Além da utilização de RA em asfaltos porosos, as técnicas de produção da mistura, em si, também podem contribuir para melhorar a sustentabilidade da infraestrutura de transportes, se, por exemplo, for utilizada associada à técnica de mistura morna, que permita a redução das temperaturas de aplicação, como o trabalho realizado por Goh e You (2012).

A reciclagem de misturas asfálticas é uma técnica de suma importância no âmbito da pavimentação sustentável. Nesse contexto, pavimentos asfálticos porosos têm importância como alternativa para melhorar o potencial sustentável de camadas de rolamento (Praticò e Vaiana, 2012a). Como exemplos de camadas asfálticas permeáveis pode-se citar as misturas porosas europeias (PEMs, do inglês, *Porous European Mixtures*), asfaltos porosos de duas camadas (TLPA, do inglês, *Two-Layer Porous Asphalt*), Camada Porosa de Atrito (CPA) e camadas de rolamento de graduação aberta (OGFC, do inglês, *Open-Graded Friction Courses*). A combinação das técnicas citadas, ou seja, de reciclagem de asfalto com o uso de asfalto poroso, pode potencializar o atendimento do pavimento a requisitos de sustentabilidade, que consideram aspectos ambientais, econômicos e sociais.

Uma das principais desvantagens das misturas porosas é sua baixa durabilidade e curta vida de serviço (Cooley *et al.*, 2009), o que implica na necessidade de frequentes intervenções de manutenção e reabilitação. Vários autores relatam a perda de agregados na superfície da camada como o principal fator que afeta a durabilidade destas misturas (Huber, 2000; Hagos *et al.*, 2007; Cooley *et al.*, 2009). Essa degradação pode ser agravada pela presença de umidade e/ou condições intensas de inverno, além de afetar a qualidade da passagem dos veículos e acelerar o aparecimento e a evolução de outros defeitos (Arámbula-Mercado *et al.*, 2019). Os testes mais utilizados para avaliar misturas porosas, comuns às especificações técnicas de vários países, são o desgaste Cantabro e RT. O primeiro avalia a durabilidade por meio da resistência à perda de agregados, enquanto o segundo avalia a resistência aos esforços de tração. No que se refere à resistência à água, é comum a realização de testes em corpos de prova (CP) antes e após etapa de condicionamento em água ou a realização de ensaios que avaliem o dano por umidade, como o ensaio de dano por umidade induzida. Já para a avaliação do desempenho funcional dessas camadas, ensaios de permeabilidade e verificação de textura costumam ser realizados.

3. MATERIAS E MÉTODO

A execução do presente trabalho contou com o apoio de uma empresa privada, que em 2017 passou a utilizar CPA no meio urbano, ou seja, vias que, na sua maioria, não são de alto volume de tráfego. A empresa utiliza misturas enquadradas na Faixa II ES 386 (DNER, 1999). A dosagem da mistura utilizada pela empresa e analisada neste trabalho foi realizada pelo método Marshall e o teor, definido como ótimo, de ligante foi aquele que atingiu o V_v de 21,5%, nesse caso 4,2%. No entanto, para atingir o objetivo deste trabalho, esta dosagem teve que ser adaptada para que o RA pudesse também compor a mistura. Para tanto, inicialmente, foram obtidas as curvas granulométricas do RA, antes e após a extração do ligante (realizada com o uso do equipamento Rotarex), mostradas na Figura 1a. É possível perceber que a fração $\frac{1}{2}$ ''

(12,5mm) está presente no material (percentual passante em torno de 90%), o que impossibilita utilizá-lo da forma como este é coletado em uma mistura que esteja enquadrada na Faixa II (Tabela 1), que exige que 100% do material passe na fração ½”. Dessa forma, foi necessário separar esta fração do restante do material, obtendo-se novas proporções para as frações restantes para compor a curva granulométrica do RA.

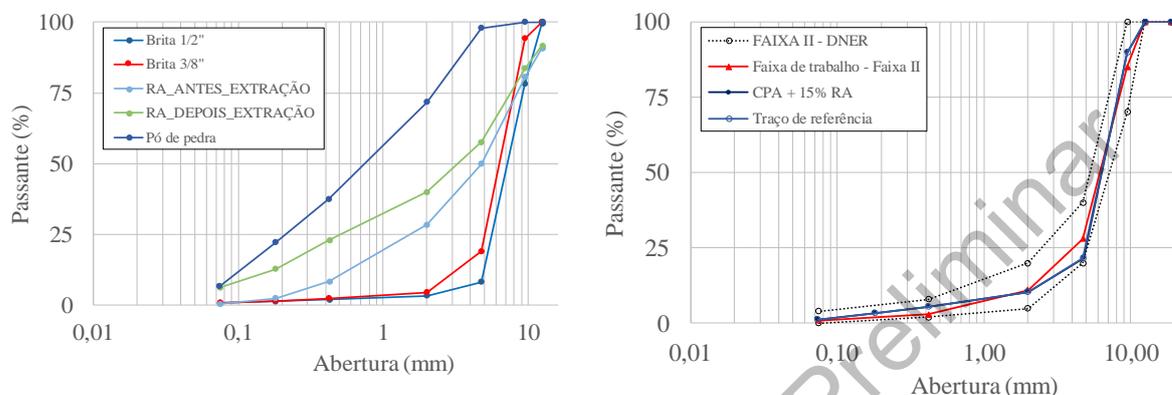


Figura 1: Granulometrias do RA, da mistura de referência e da mistura que contém 15% de RA

Além da curva granulométrica, é necessário determinar o teor de ligante que o RA contém. Por isso, foram realizadas extrações com e sem a fração ½” do agregado, de onde foram obtidos os teores de 3,5% e 3,7%, respectivamente. Neste trabalho considerou-se 100% de mobilização do ligante antigo, portanto, a curva granulométrica que interessa nessa etapa é aquela obtida após a extração. Como a fração ½” do RA não foi utilizada, adotou-se como teor de ligante do RA o valor de 3,5%.

Os demais agregados utilizados foram britas 3/8”, ½” e pó de pedra (Figura 1a), todos de origem granítica. Para que a curva granulométrica a ser investigada fosse encaixada na Faixa II da especificação brasileira de CPA, de posse das propriedades dos materiais disponíveis na empresa, utilizou-se o traço cuja composição é mostrada na Tabela 2 e na Figura 1b. Para a realização deste trabalho, foram utilizadas 3 misturas, mostradas na Tabela 2, a saber: (i) CPA de referência, preparada em laboratório, (ii) CPA reciclada e (iii) mistura de campo, oriunda da usina. As granulometrias das misturas reciclada e de referência também são mostradas na Figura 1b. As proporções da mistura de referência foram definidas de tal forma que as proporções dos agregados virgens ficassem o mais próximo possível das respectivas proporções utilizadas na mistura reciclada. Percebe-se que a granulometria da mistura de campo e a da mistura de referência são bem próximas e estão praticamente sobrepostas.

Tabela 2: Composição (%) de agregados nas misturas utilizadas

	Brita 3/8”	Brita 1/2”	Pó de pedra	Fresado
Campo	0,55	0,35	0,10	-
Mistura reciclada	0,70	0,15	-	0,15
Traço de referência	0,60	0,30	0,10	-

O ligante utilizado foi um AMP e suas características estão resumidas na Tabela 3. Inicialmente, dispunha-se de certa quantidade de ligante (doravante, 1º ligante) em laboratório, que eventualmente não foi suficiente para as demandas que surgiram. Assim sendo, foi coletada uma nova quantidade de AMP, porém de outro lote (doravante, 2º ligante). O 1º ligante foi utilizado para produzir os CPs de CPA com adição de RA, nos teores $4,5\% \pm 0,5\%$ e $4,5\% \pm 1,0\%$ de ligante, além das massas soltas para a obtenção da massa específica máxima medida, G_{mm} . Já o 2º ligante, foi utilizado para replicar CPs da CPA reciclada no teor de projeto de ligante, após constatada a necessidade de refazer alguns ensaios (conforme será detalhado no tópico de resultados) e os CPs do traço de referência.

Tabela 3: Características dos ligantes utilizados

Características do ligante	Método	1º ligante	2º ligante
Penetração, 100g, 5s, 25°C, %	NBR-6576	48	48
Recuperação elástica, 20cm, 25°C, %	NBR-15086	81	78
Ponto de amolecimento, °C	NBR-6560	60	57
Viscosidade Brookfield a 135°C, cP	NBR-15184	1.275	1.025
Viscosidade Brookfield a 150°C, cP	NBR-15184	485	437
Viscosidade Brookfield a 177°C, cP	NBR-15184	202	209
Temperatura de usinagem (°C)	-	177 a 180	177 a 180
Temperatura de compactação (°C)	-	166 a 171	166 a 171

Na presente pesquisa, o RA foi introduzido à temperatura ambiente na mistura, pois decidiu-se que seu aquecimento se daria por troca de calor com os agregados virgens superaquecidos, no intuito de simular o processo de mistura que costuma ser utilizado em usinas do tipo *drum mixer* na cidade onde essa pesquisa foi realizada. O AMP foi aquecido à 180° e os agregados virgens à 200°, ou seja, 20° acima da temperatura de usinagem do ligante para compensar o fato de que aqui o RA não foi pré-aquecido. O tempo de contato entre os materiais virgens e o RA, quando da mistura em laboratório, foi aquele suficiente para que se percebesse que os agregados virgens e o RA fossem envolvidos pelo AMP e para que a mistura atingisse a temperatura de compactação, o que, acontecia, aproximadamente entre 2 e 3 minutos.

Nesta pesquisa, definiu-se que o teor de projeto de ligante seria aquele cujo Vv ficasse próximo de 22%, que é um valor intermediário dentro dos limites estabelecidos pela norma. A Tabela 4 mostra os Vv obtidos para cada teor, onde é possível perceber que o teor de projeto é 4,5%.

Tabela 4: Vv(%) dos CPs produzidos para dosagem da CPA com 15% de RA

CP / Teor de CAP	3,5%	4,0%	4,5%	5,0%	5,5%
CP1	24,5	22,5	22,4	19,0	20,9
CP2	22,6	21,8	21,0	18,4	17,9
CP3	25,6	23,0	21,9	17,3	18,7
Média	24,2	22,5	21,8	18,2	19,1

Para que se possa comparar a mistura reciclada com a de referência e com aquela utilizada em campo, é necessário manter alguns parâmetros similares, como as curvas granulométricas e o Vv. O teor de projeto de ligante da mistura utilizada em campo foi de 4,2% e seu Vv foi de, aproximadamente, 22%, parâmetros muito similares aos obtidos para a mistura reciclada. Escolheu-se testar um teor de 4,5% de AMP para a mistura de referência, já que esta possui

praticamente a mesma curva granulométrica da mistura utilizada em campo. Além disso, como a dosagem Marshall permite uma variação de $\pm 0,3\%$ no teor de projeto de ligante, considerou-se que as três misturas estão, praticamente, com o mesmo teor de ligante. A Tabela 5 resume os teores de CAP encontrados, a G_{mm} e o V_v dessas três misturas.

Tabela 5: Teor de projeto, G_{mm} e V_v das misturas reciclada, de referência e de campo

	Reciclada	Referência	Campo
Teor de projeto (%)	4,5	4,5	4,2
G_{mm}	2,483	2,464	2,459
V_v (%)	21,8	21,3	22,2

O comportamento das misturas asfálticas foi avaliado por meio dos ensaios exigidos em norma, que são desgaste Cântabro e RT. Além disso, com a massa solta utilizada para medir a G_{mm} da mistura reciclada, foram moldados CPs no compactador giratório com 50 giros, quantidade recomendada pela especificação americana (Superpave) para que se obtenha uma mistura de alto volume de vazios.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados encontrados para o ensaio de desgaste Cântabro são resumidos na Tabela 6. Observa-se que a mistura contendo RA foi a que apresentou o maior valor de perda, ainda que inferior ao limite de 25%. Quando se compara a mistura reciclada e o traço de referência, observa-se que o fato de haver mistura de ligantes com diferentes níveis de envelhecimento na mistura reciclada pode ser a causa desse maior desgaste na mesma, apesar de não ser possível afirmar com a quantidade de observações que se dispõe que essa diferença é, estatisticamente, significativa. A mistura utilizada em campo pela empresa, retirada diretamente da usina, apresentou o menor valor de desgaste. Supõe-se que isso pode ter ocorrido devido ao processo de usinagem em grande escala, que pode ser mais eficiente quanto à interação do AMP com os agregados, o que pode também contribuir para o melhor comportamento com relação a esse aspecto.

Tabela 6: Resultados do desgaste Cântabro e V_v dos CPs

	Campo		Mistura reciclada		Traço de referência	
	Desgaste Cântabro (%)	V_v (%)	Desgaste Cântabro (%)	V_v (%)	Desgaste Cântabro (%)	V_v (%)
CP1	10,0	22,2	23,0	23,4	17,0	21,2
CP2	-	-	22,0	21,0	19,0	21,8
Média	10,0	22,2	22,5	22,2	18,0	21,5

O ensaio de RT foi realizado nos CPs compactados (i) seguindo a metodologia Marshall utilizados na dosagem, (ii) naqueles moldados com o uso do compactador giratório Superpave e (iii) nas amostras oriundas de campo, também compactadas pelo método Marshall. As médias dos resultados são apresentadas na Figura 2. Como pode-se perceber, os valores de RT obtidos para as amostras da mistura reciclada que foram compactadas utilizando a metodologia Marshall apresentaram-se abaixo do valor mínimo exigido por norma. Já para a compactação giratória, apenas as amostras com os teores de 4,0% e 5,0% de ligante apresentaram valores acima do mínimo de 0,55MPa, mas todos eles foram maiores do que aqueles encontrados para as amostras compactadas pelo método Marshall. As duas amostras oriundas de campo, por sua vez, apresentaram valores de RT de 0,52MPa e 0,66MPa, média de 0,59MPa, maior, pois, que

o mínimo exigido em norma. No entanto, uma amostragem maior é necessária para que se possa concluir algo nesse sentido. De toda forma, percebe-se uma certa tendência da mistura oriunda de campo apresentar propriedades superiores às das propostas neste trabalho pelo motivo já apresentado quando da discussão dos resultados de desgaste Cântabro.

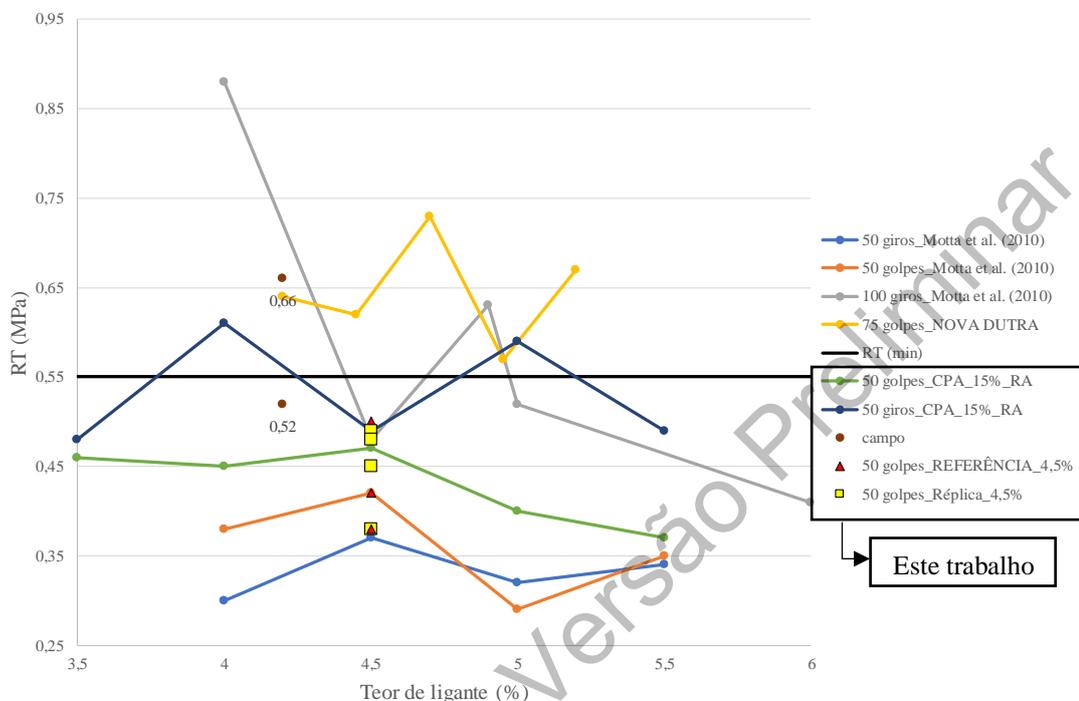


Figura 2: Resultados de RT em função do teor de ligante para CPAs investigadas nesse trabalho e na literatura

Na Figura 2, além dos resultados obtidos nesta pesquisa, também foram plotados valores referentes à outras CPAs encontradas na literatura principalmente no trabalho conduzido por Motta *et al.* (2010) e pela Nova Dutra (2009). No trabalho realizado por Motta *et al.* (2010), foram investigadas misturas compactadas pelos métodos Marshall e Superpave, com variação do número de giros (50 e 100) e de golpes (50 e 75 - produzidos pela Nova Dutra, 2009). A granulometria das misturas investigadas na pesquisa mencionada anteriormente encaixa-se na faixa 9,5mm do Arizona para CPA e está representada na Figura 3, onde é possível perceber que a curva granulométrica referida também se encaixa na faixa II do DNER. Dessa forma, considerou-se que a comparação das misturas produzidas por Motta *et al.* (2010) e pela Nova Dutra (2009) com as da presente pesquisa é razoável. Pela Figura 2 é possível perceber que a mistura reciclada apresentou propriedades melhores do que os das misturas produzidas com 50 giros e com 50 golpes por Motta *et al.* (2010), para todos os teores de CAP, para os dois métodos de compactação. É importante ressaltar que os resultados obtidos pela presente pesquisa no que diz respeito à eficiência da compactação giratória ser superior à Marshall não foi confirmada pelos resultados de Motta *et al.* (2010), que apresentou tendência contrária. De fato, Nascimento (2008) concluiu que a energia de compactação Marshall não tem relação fixa com a energia do compactador giratório Superpave, relação esta que depende do esqueleto pétreo da mistura.

Como o valor mínimo de 0,55MPa não foi atingido para as amostras que foram compactadas utilizando o compactador Marshall, que é o tipo de compactação utilizada na dosagem de CPAs no Brasil, procedeu-se à replicação da mistura reciclada no teor de 4,5% de CAP, aquele

considerado como o teor de projeto. Com isso, pretendia-se, de certa forma, aumentar o número de amostras da mistura reciclada para minimizar os efeitos da variabilidade dos ensaios de laboratório nas conclusões a serem tiradas. Além disso, nessa fase foram produzidos CPs com o traço de referência. Tanto para as réplicas da mistura reciclada quanto para a mistura de referência, foram produzidos 6 CPs: 4 para a realização do ensaio de RT e 2 para a realização do desgaste Cântabro. Os resultados de RT para esses CPs são apresentados na Figura 2, juntamente com os resultados de RT já comentados anteriormente. De fato, percebe-se que o valor de RT é similar aquele já obtido durante a etapa de dosagem, ou seja 0,45MPa em média. Quanto ao resultado encontrado para a mistura de referência, os dados mostraram-se mais dispersos e, em média, o RT foi 0,42MPa. Esse cenário pode ser devido à presença de ligante envelhecido na mistura reciclada, que tende a aumentar sua rigidez. Centofante *et al.* (2018) concluíram que os valores de RT aumentam conforme aumentou-se o teor de fresado em um concreto asfáltico denso e os autores acreditam que esses resultados se deveram à presença do fresado, que, por sua vez, eleva a rigidez da mistura.

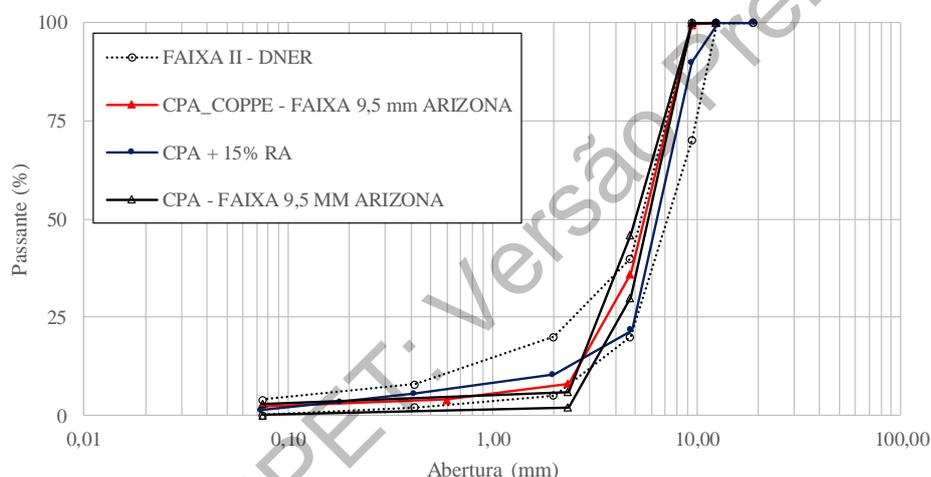


Figura 3: Curvas granulométricas encontradas em Motta *et al.* (2010) e da mistura reciclada avaliada no presente estudo

A mistura compactada com 75 golpes (Marshall) (Nova Dutra, 2009) apresentou RTs que variaram de 0,57 MPa a 0,73 MPa, que são superiores ao mínimo sugerido em norma (0,55MPa), bem como superiores às demais misturas apresentadas na Figura 2 para a maioria dos teores de ligante e métodos de compactação testados. O maior esforço de compactação em laboratório – em relação à mesma mistura quando compactada com 50 golpes - pode ter contribuído para uma melhoria do intertravamento do esqueleto mineral, elevando a resistência da mistura, mas é importante verificar se não está ocorrendo quebra de agregados e se a capacidade drenante da camada não está sendo prejudicada. O aumento do número de giros na compactação Superpave (de 50 para 100), nas misturas de Motta *et al.* (2010), por outro lado, não conduziu a resultados conclusivos, as amostras apresentaram um comportamento variável para diferentes teores de ligante/Vv.

A relação entre o Vv e o teor de ligante também foi avaliada nesta pesquisa para os dois métodos de compactação, os resultados são mostrados na Figura 4, bem como os resultados referentes à análise conduzida pela Motta *et al.* (2010) e por Nova Dutra (2009). É possível perceber que os resultados de Vv para a CPA reciclada em estudo foram próximos para os diversos teores de ligante quando diferentes métodos de compactação (Marshall e Superpave) foram utilizados. Já

para as misturas avaliadas por Motta *et al.* (2010) com 50 giros (Superpave) e 50 golpes (Marshall), esses valores foram mais distintos. Embora no estudo conduzido por Nova Dutra (2009) os resultados de RT tenham sido superiores quando a compactação Marshall (75 golpes) foi utilizada, percebe-se que o Vv fica comprometido, variando entre 15,3 e 18,1%, o que não atinge os limites estabelecidos pela norma brasileira (mínimo de 18% e máximo de 25%). Também é possível perceber que o Vv é menos sensível à variação da compactação Superpave (de 50 para 100 giros) quando comparada à variação da compactação Marshall (de 50 para 75 golpes), o que é possível perceber na Figura 4 ao se observar a distância entre as linhas referentes a 50 e 100 giros comparada àquela entre as linhas referentes à 50 e 75 golpes. Por fim, verifica-se que os resultados oriundos da compactação Marshall têm maior correlação com o Vv do que aqueles oriundos da compactação giratória, conforme indicado pelos coeficientes R^2 mostrados ao lado das linhas de tendência da Figura 4.

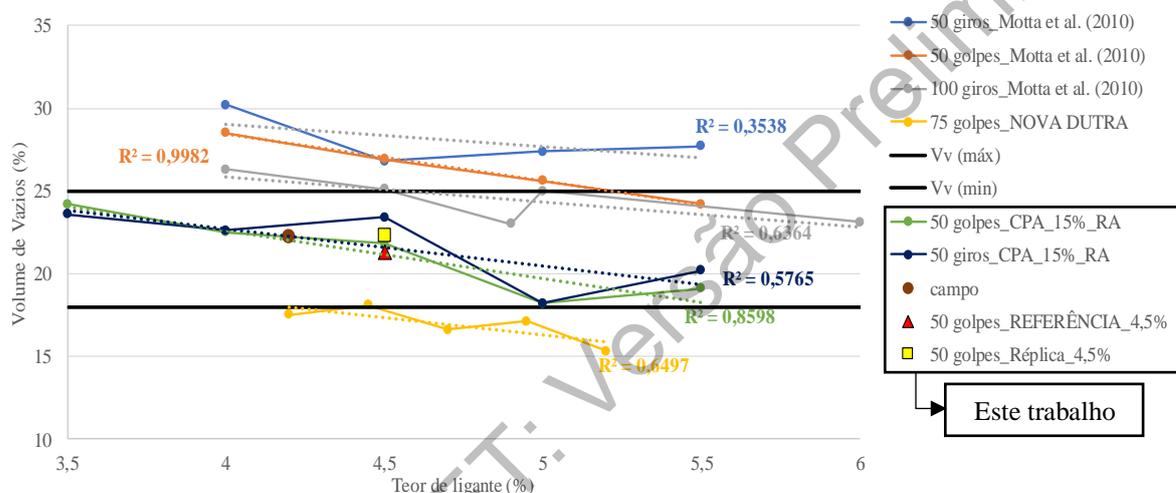


Figura 4: Resultados de Vv em função do teor de ligante para várias CPAs avaliadas nesse estudo e presente na literatura

Leandro *et al.* (2014) constataram que, mantidas as mesmas condições de temperatura de compactação e de distribuição granulométrica, os Vv de misturas densas compactadas pelos métodos Marshall e Superpave (de 100 mm de diâmetro), a 75 golpes e 100 giros, respectivamente, são semelhantes e tem tendências parecidas (no que se refere ao Vv ao variar o teor de ligante). No caso de misturas abertas, como é o caso da CPA, esse comportamento não foi observado ao serem comparadas a mistura de Motta *et al.* (2010) de 100 giros com a da Nova Dutra (2009) – de 75 golpes.

Watson *et al.* (2003) recomendam compactação Superpave com 50 giros para misturas porosas, baseada numa avaliação macroscópica de densidade, quebra de agregados e no contato grão-a-grão. Mallick *et al.* (2000) afirmam que 50 golpes na compactação Marshall em misturas do tipo SMA (do inglês *Stone Matrix Asphalt*) – que, assim como as CPAs, são abertas – são equivalentes a 100 giros na compactação Superpave. No entanto, na Figura 4, o comportamento da mistura reciclada com as compactações de 50 golpes e 50 giros tanto apresenta a mesma tendência quanto é semelhante em termos de volume vazios, visto que as curvas estão próximas. De fato, apesar da especificação ASTM D 7064-04 recomendar 50 giros para misturas porosas, essa especificação afirma que a compactação nessas misturas pode ser feita com outras formas de compactação, desde que forneça densidade compactada semelhante. Alvarez *et al.* (2011),

no entanto, afirma que essa recomendação pode levar a resultados inconsistentes devido a diferenças na estrutura interna das misturas para amostras compactadas de diferentes formas.

Um fato curioso observado em laboratório foi que a G_{mm} da mistura de referência, que contém 4,5% de ligante, foi similar àquela da mistura reciclada com teor de 5,0% de ligante, esses valores são 2,464 e 2,458, respectivamente, enquanto que para a mistura reciclada com 4,5% de ligante a G_{mm} foi 2,483. A hipótese que aqui é levantada é que tal semelhança entre as densidades da mistura de referência e da mistura reciclada com maior teor de ligante - dado que as curvas granulométricas são próximas - pode ser devida à não mobilização completa do ligante presente no RA, o que vai contra a premissa aqui adotada de que o ligante envelhecido teria sido 100% mobilizado. De acordo com os resultados obtidos em estudo conduzido por Stephens *et al.* (2001), o tempo de aquecimento do RA antes de ser misturado aos agregados e ligante virgens tem efeito na resistência da mistura (os autores variaram o tempo de pré-aquecimento do RA de 0 a 540 minutos), o que indica que ocorre mistura entre ligantes envelhecido e virgem, mas os resultados de resistência obtidos continuaram variando durante os tempos testados. Assim, acredita-se que os tempos de mistura utilizados na presente pesquisa, entre os materiais virgens e o RA, que foram de cerca de 2 a 3 minutos, não foram suficientes para que 100% de mobilização do ligante envelhecido do RA ocorresse.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES

Neste trabalho foi avaliado o comportamento de uma CPA, com 15% de RA adicionado, conforme os requisitos da norma brasileira para este tipo de mistura. Assim, foi realizada a dosagem desta mistura pelo Método Marshall, foi verificado o V_v dos CPs e foram executados os ensaios de RT e Cântabro. A mistura reciclada foi comparada a uma mistura de referência, virgem, preparada em laboratório, e a uma mistura advinda diretamente da usina e compactada em laboratório pelo método Marshall. Além disso, os métodos de compactação Marshall e Superpave foram comparados. Por fim, os resultados obtidos no presente estudo foram comparados a trabalhos encontrados na literatura.

Observa-se que muitas das misturas do tipo CPA, inclusive misturas virgens, tanto as encontradas na literatura quanto as propostas nesse trabalho, não atingiram o limite mínimo de 0,55 MPa. Observaram-se resultados superiores para as misturas oriundas da usinagem e compactadas em laboratório, em relação àquelas misturadas e compactadas em laboratório, o que pode ser um indicativo de que o processo de mistura em usina seja mais eficiente. Os resultados do ensaio de desgaste Cântabro demonstram que, para as misturas recicladas, há uma perda nessa propriedade provavelmente devido a mistura entre o AMP e o ligante envelhecido oriundo do RA.

A utilização de 15% de fresado na composição da CPA em estudo originou resultados semelhantes àqueles encontrados em misturas que utilizaram apenas materiais virgens, o que sugere que a proposta pode ser promissora. Quanto aos métodos de compactação em laboratório, aqui estudados, observou-se tendência de melhor comportamento, no que diz respeito à RT, com a aplicação de 50 giros (Superpave) do que com a aplicação de 50 golpes (Marshall). O mesmo não foi verificado ao se comparar com o estudo conduzido por Motta *et al.* (2010). Assim, nota-se certa dificuldade de concluir o tipo e o esforço de compactação que promovem melhores misturas sem prejuízos às demais propriedades da CPA. Embora a compactação Marshall e Superpave envolvam diferentes mecanismos de compactação e embora já tenha sido constatado em outros estudos sobre esse tema que 50 giros e 50 golpes não sejam

esforços equivalentes, nesse estudo obteve-se que para esses níveis de compactação, a volumetria das amostras manteve-se similar em diferentes teores de ligante testados. De fato, Nascimento (2008) e Alvarez *et al.* (2011) afirmam que as compactações Marshall e Superpave não possuem relação fixa de energia e que essa relação depende do esqueleto pétreo/estrutura interna da mistura.

Para trabalhos futuros, sugere-se a avaliação de outras propriedades das misturas do tipo CPA recicladas com o uso de ensaios mais próximos ao atual estado da arte. Além disso, é necessária investigação, à nível de ligante, da interação entre o AMP e o ligante envelhecido presente no RA, especialmente nos casos de utilização de maiores teores de fresado, o que também é interessante ser investigado para que a utilização deste material seja potencializada. Assim como o que vem sendo feito para misturas densas no sentido de aumentar o teor de RA, encorajase a investigação das técnicas mornas de mistura em CPAs.

Por se tratar de um tipo de revestimento cuja principal função é drenar, a avaliação do impacto da utilização de teores de RA na permeabilidade desta camada é muito importante. Levando-se em consideração os resultados obtidos na presente pesquisa, também é sugerida a aplicação de maior energia de compactação Marshall (75 golpes) em laboratório, verificando-se se há melhorias no comportamento da mistura sem prejudicar sua volumetria.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio financeiro da pesquisa das agências CAPES e CNPq, pelas bolsas de mestrado concedidas. Agradece-se também à Insttale Engenharia pelo apoio em infraestrutura de laboratório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarez, A. E., A. E. Martin, C. Estakhri (2011) A Review of Mix Design and Evaluation Research for Permeable Friction Course Mixtures. *Construction and Building Materials*, v. 25, n. 3, p. 1159-1166.
- Arámbula-Mercado, E., S. Caro, C. A. R. Torres, P. Karki, M Sánchez-Silva e E. S. Park (2019) Evaluation of FC-5 with PG 76-22 HP to Reduce Raveling (BE287: Final Report). Texas A&M Transportation Institute. Texas, U.S.A.
- ASTM INTERNATIONAL (2006) ASTM D 7064-04 - *Standard Practice for Open-graded Friction Course (OGFC) Mix Design*. West Conshohocken, PA.
- Barco Carrión, A. J.; D. Lo Presti e G.D. Airey (2015) Binder Design of High RAP Content Hot and Warm Asphalt Mixture Wearing Courses. *Road Materials and Pavement Design*, v. 16, n. S1, p. 460-474.
- Bernucci, L.B., Motta, L.M.G., Soares, J.B., Ceratti, J.P. (2010) Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros. Petrobras-ABEDA, Rio de Janeiro-RJ
- Centofante, R., L. P. Specht, P. O. B. A. Junior, R. J. B. Pinheiro e D. S. Pereira (2018) Avaliação do comportamento de misturas asfálticas recicladas a quente com inserção de material fresado. *Revista Matéria On-line Version (Rio de Janeiro)*, v. 23, n. 3.
- Cooley Jr., L.A., J. W. Brumfield, R. B. Mallick, W. S. Mogawer, M. Partl, L. Pulikakos e G. Hicks (2009) Construction and Maintenance Practices for Permeable Friction Courses (National Cooperative Research Program Report 640). In: National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Copeland, A. (2011) Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice. In Publication No. FHWA-HRT-11-021. US Department of Transportation.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER (1999) DNER-ES 386/1999: Pavimentação – pré-misturado a quente com asfalto polímero – camada porosa de atrito. Rio de Janeiro-RJ.
- Frigio, F., E. Pasquini, G. Ferrotti e F. Canestrari (2013) Improved durability of recycled porous asphalt. *Construction and Building Materials*, v. 48, p. 755–763.
- Frigio, F., E. Pasquini, M. N. Partl e F. Canestrari (2015) Use of Reclaimed Asphalt in Porous Asphalt Mixtures: Laboratory and Field Evaluations. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 27(7): 04014211.
- Goh, S. W. e Z. You (2012) Mechanical Properties of Porous Asphalt Pavement Materials with Warm Mix Asphalt and RAP. *Journal of Transport Engineering*, v. 138, n.1, p. 90-97.

- Hagos, E. T., A. A. A. Molenaar, M. F. C. Van de Ven e J. L. M. Voskuilen (2007) Durability Related Investigation into Porous Asphalt. *Proceedings of the International Conference on Advanced Characterisation of Pavement and Soil Engineering Materials*. Greece, Athens.
- Huber, G. (2000) Performance Survey on Open-Graded Friction Course Mixes (Synthesis of Highway Practice 284). In *Transportation Research Board*, National Research Council, Washington, D.C.
- Kanou, T., H. Nitta, I. Sasaki, A. Kawakami e K. Kubo (2010) Highly-Aged and Highly Modified Asphalt Concrete Recycling in Japan. In *11th International Conference on Asphalt Pavements*, v. 1. Nagoia, Aichi, Japan.
- Kennedy, T. W., W. O. Tam e M. Solaimanian (1998) Optimizing Use of Reclaimed Asphalt Pavement with the SuperPave System. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 67, p. 311-333.
- Leandro, R. P., K. L. Vasconcelos, L. L. B. Bernucci, I. A. Beja e J. M. Chaves (2014) Efeito do Tipo de Compactação no Volume de Vazios de uma Mistura Asfáltica Densa. *43ª RPAV – Reunião Anual de Pavimentação e 17º ENACOR – Encontro Nacional de Conservação Rodoviária*. Alagoas, Maceió.
- Mallick, R. B., P. S. Kandhal, L. A. Cooley Jr e D. E. Watson (2000) Design, Construction, and Performance of New-Generation Open-Graded Friction Courses (NCAT Report No. 2000-01). *Annual Meeting of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Reno, Nevada.
- Mallick, R. B., P. S. Kandhal e R. L. Bradburry (2008) Using Warm Mix Asphalt Technology to Incorporate High Percentage of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) material in asphalt mixes. In *86th TRB - Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C.
- Motta, L. M. G, F. L. B. Ribeiro e S. F. Estefen (2010) Relatório Final: Estudo Comparativo do Comportamento de Fadiga de Misturas Betuminosas com Diferentes Teores de Asfalto. Convênio PEC 8650, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ.
- Nascimento, L. A. H. (2008) Nova Abordagem da Dosagem de Misturas Asfálticas Densas com Uso do Compactador Giratório e Foco na Deformação Permanente. *Dissertação de Mestrado*. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- NOVA DUTRA (2009) Dosagem de Camada Porosa de Atrito (CPA). CPA – Faixa Arizona. CCR-RMA-CPA-AZN-032/2009 – CAP M DE 14/04/2009. Grupo CCR – ENGELOG. 2009.
- Praticò, F. G. e R. Vaiana (2012) Improving infrastructure sustainability in suburban and urban areas: Is porous asphalt the right answer? And how? *WIT Transactions on The Built Environment*, v. 128, p. 673–684.
- Praticò, F. G., R. Vaiana, M. Giunta, A. Moro e T. Iuele (2012) Permeable Wearing Courses by Recycling PEMs: Strategies and Technical Procedures. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, v. 53, p. 276 – 285.
- Praticò, F. G., R. Vaiana e M. Giunta (2013) Pavement Sustainability: Permeable Wearing Courses by Recycling Porous European Mixes. *Journal of Architecture Engineering*, v.19, n.3, p. 186-192.
- Stephens, J. E., J. Mahoney e C. Dippold (2001) Determination of the PG Binder Grade to Use in a RAP Mix, Report No. JHR 00-278, Connecticut Department of Transportation, Rocky Hill, CT.
- Watson, D. E., K. A. Moore, K. Williams, L. A. Cooley Jr (2003) Refinement of New Generation Open-Graded Friction Course Mix Design. *Annual Meeting of the Transportation Research Board*, TRB. Record 1832, n. 03-3704, p. 78-85.

Carla Marília Cavalcante Alecrim (cmariliac.civil@gmail.com)
Renan Santos Maia (renanmaia@det.ufc.br)
Verônica Teixeira Franco Castelo Branco (veronica@det.ufc.br)
Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará
R. Prof. Armando Farias, 703 - Pici, Fortaleza - CE, 60020-181