INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DO FILME DE LIGANTE NA DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM BORRACHA DO TIPO RAR

INFLUENCE OF THE FILM THICKNESS ON THE DOSAGE OF ASPHALT MIXTURES USING RAR

Letícia Nunes Lopes - leticiacnunes@gmail.com **-** https://orcid.org/0009-0006-9151-936X
Márcio Muniz de Farias - mmuniz94@gmail.com - https://orcid.org/0000-0002-5257-911X
Luiz Guilherme Rodrigues de Mello - luiz.mello@dnit.gov.br - https://orcid.org/0000-0002-1507-0154

RESUMO: O uso de borracha moída de pneu (BMP) em misturas asfálticas por via úmida (do tipo *field blend*) é praticado há anos nos Estados Unidos, com histórico de bom desempenho. No entanto, tem como desvantagens a necessidade de equipamento apropriado ao processo de fabricação instalado na usina, altas temperaturas de agitação do ligante modificado e maior tempo de preparo. No Brasil é mais comum a produção de mistura asfalto-borracha (AB) a partir do ligante modificado na distribuidora (do tipo *terminal blend*), consumindo uma menor quantidade de borracha e adicionando óleos extensores durante sua produção. A *Reacted and Activated Rubber* (RAR), composta por asfalto convencional, granulado fino de borracha e fíler, foi desenvolvida com a proposta de simplificação do processo de usinagem, proporcionando a utilização de uma maior porcentagem de BMP e um processo de mistura a temperaturas mais baixas. A RAR atua como um fíler seco e muito áspero, portanto torna-se extremamente importante determinar sua superfície específica e espessura do filme de ligante $\boldsymbol{TF}$ para a dosagem da mistura. Segundo Nanjegowda *et al*. (2019), devido a sua composição, a RAR pode ser considerada interagindo como agregado ou como ligante, dentro da mistura asfáltica, e tais considerações resultarão em diferentes $\boldsymbol{TFs}$. Este estudo buscou avaliar a $\boldsymbol{TF}$ na etapa de dosagem de misturas asfálticas do tipo *gap-graded* com e sem a adição de RAR, a partir da metodologia desenvolvida pelos autores. Os resultados apresentam valores de $\boldsymbol{TF}$ na faixa recomendada pelos referidos autores para a prevenção ao surgimento de trincas e desagregação da mistura.

PALAVRAS-CHAVE: asfalto-borracha; dosagem de misturas asfálticas; espessura do filme de ligante.

ABSTRACT: *The use crumb rubber in field blend processs has been practiced for years in the United States, with a history of good performance. However, it has disadvantages such as the need for appropriate equipment for the manufacturing process installed in the plant, high temperatures and longer time to reaction. In Brazil, it is more common to produce asphalt-rubber mixtures using terminal blended modified asphalt-rubber, which consumes a smaller amount of rubber and adds extender oils during its production. The Reacted and Activated Rubber (RAR), composed of conventional asphalt, fine crumb rubber and filler, was developed with the aim of simplifying the hot mixing process, allowing the use of a higher percentage of rubber and lower mixing temperatures. RAR acts as a dry and very rough filler, therefore determining its specific surface and the binder film thickness* TF*) to properly dose the asphalt mixture. According to Nanjegowda et al. (2020), due to its composition, RAR can be considered*

Submetido em 28/05/2023 e aceito em 23/08/2023.

https://doi.org/10.70859/2764-9539.v2.n2.65

interacting as an aggregate or as a binder, within the asphalt mixture and such considerations will result in different TFs. Thus, this study aims to evaluate the TF in the gap-graded asphalt mixtures designed with and without the addition of RAR, based on the methodology developed by the authors. The results show TF values in the range recommended by the aforementioned authors for preventing the appearance of cracks and ravelling ofthe mixture.

***KEYWORDS**: asphalt rubber; rubberized asphalt; dosage of asphalt mixtures; film thickness.*

1 INTRODUÇÃO

Para que os pavimentos sejam duráveis, é premissa necessária, além do dimensionamento adequado e execução construtiva conforme o projeto, o uso de ligantes que promovam melhorias das características e propriedades mecânicas das misturas asfálticas, solução atrelada ao avanço na tecnologia de materiais. Para pavimentos flexíveis, algumas destas melhorias foram feitas com a modificação do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), adicionando polímeros, fibras sintéticas, fíleres e borracha granulada de pneus usados (Leite, 1999; Lucena *et al*., 2004; Dantas Neto, 2004; Mello, 2008; Pamplona *et al*., 2012; Yusoff *et al*., 2013; Nuñez *et al*., 2014; Li *et al*., 2017; Nunes, 2017; Bastidas-Martínez *et al*., 2021, Lopes *et al*., 2021 e Lopes, 2022).

O uso de borracha moída de pneu (BMP) em misturas asfálticas por via úmida (do tipo field blend) é praticado há anos nos Estados Unidos, com histórico de bom desempenho. No entanto, tem como desvantagens a necessidade de equipamento apropriado ao processo de fabricação instalado na usina de altas temperaturas de agitação do ligante modificado e de maior tempo de preparo.

A BMP pode ser adicionada ao concreto asfáltico como parte dos agregados ou como um agente modificador do ligante asfáltico. O tamanho, a forma e a textura da BMP necessários variam a depender da aplicação proposta (Heitzman, 1992). Diversos estudos abordam os processos e as tecnologias empregadas durante a produção de misturas modificadas com borracha, a qual pode ser obtida por meio de dois processos principais: seco e úmido (Heitzman, 1992; Bahia e Davis, 1994; Epps, 1994; Abdelrahman e Carpenter, 1999; Visser e Verhaeghe, 2000; Takallou e Takallou, 2003).

No Brasil é mais comum a produção de mistura asfalto-borracha (AB) a partir do ligante modificado na distribuidora (do tipo terminal blend), que consome uma menor quantidade de borracha e adiciona óleos extensores durante sua produção. Misturas asfálticas obtidas com esse tipo de AB apresentam pior desempenho mecânico quando comparado às misturas produzidas pela via úmida (do tipo field blend) (Shatnawi, 2011). Pesquisas desenvolvidas em universidades brasileiras, considerando diferentes vias de modificação, vêm mostrando as melhorias da incorporação de borracha às misturas asfálticas (Oda, 2000; Salini, 2000; Specht, 2004; Dantas Neto, 2004; Pinheiro, 2004; Wickboldt, 2005; Faxina, 2006; Mello, 2008; Fontes, 2009; Camargo, 2016; Nunes, 2017 e Lopes 2022).

A *Reacted and Activated Rubber* (RAR) foi desenvolvida com a proposta de simplificação do processo de usinagem (como o realizado na mistura asfáltica obtida pela via seca) e obtenção de desempenho da mistura asfáltica superior (como a mistura asfáltica obtida pela via úmida, segundo a técnica empregada na terminologia do tipo field blend), além da utilização de uma maior

porcentagem de borracha e um processo de mistura a temperaturas mais baixas. Esses materiais, quando adicionados a um CAP de base, apresentam características aceitáveis de AB, normatizado pela ASTM D 6114/09 (Lopes *et al*., 2021).

Nos projetos de misturas asfálticas é desejada uma distribuição de agregados que resultem em maior intertravamento do esqueleto mineral. Devido às partículas de borracha, notou-se que o ligante AB proporcionaria uma maior espessura do filme de ligante (TF, fim thickness) em relação a ligantes convencionais. Dessa forma, observou-se a necessidade de ajustar a granulometria do agregado, para se ter uma grande quantidade de Vazios no Agregado Mineral (VAM).

Segundo Nanjegowda *et al*. (2020), a RAR pode ser considerada interagindo como agregado ou como ligante, dentro da mistura asfáltica, e tais considerações resultarão em diferentes TFs. No referido estudo, os autores desenvolveram a metodologia para o cálculo de TF associando essa variável aos resultados de campo (surgimento de trincas e desagregação) em 18 misturas de diferentes granulometrias, sem modificação e modificadas com RAR.

Assim, o objetivo do presente artigo foi avaliar a metodologia de cálculo do TF de Nanjegowda *et al*. (2020), aplicada na dosagem de uma mistura asfáltica de granulometria descontínua usinada a quente, a qual foi produzida em laboratório com adição de RAR. Posteriormente, os resultados obtidos foram comparados aos valores de referência presentes nas pesquisas de Nanjegowda *et al*. (2020) e Shah (2018).

2 *REACTED AND ACTIVATED RUBBER* – RAR

Chavez *et al*. (2019) denominaram a utilização da RAR na produção de misturas asfálticas como um processo de produção de AB semiúmido, uma vez que a BMP é submetida a um pré-tratamento, em uma etapa de digestão prévia, como ocorre na produção do ligante AB por via úmida (field blend), sendo diretamente adicionada no misturador da usina como um material seco durante a produção da mistura asfáltica.

A RAR é composta por asfalto convencional, granulado fino de borracha (usualmente passando na peneira Nº 30) e por material de enchimento (fíler) em porcentagens devidamente otimizadas (Ishai *et al*., 2011). Geralmente, a RAR consiste em cerca de 62 a 65 % de borracha moída, 20 a 25 % de asfalto convencional e 15 a 20 % de fíler. Durante a produção, o CAP utilizado apresenta característica de menor rigidez, permitindo uma melhoria na viscosidade, que garante a trabalhabilidade dos ligantes, mesmo em caso de utilização de maior teor de borracha (Shah, 2018).

Nunes (2017) destaca as vantagens de logística no transporte e produção, pelo fato de o material poder ser armazenado de forma ensacada em grandes quantidades, não despender instalações específicas na planta de usinagem e não necessitar aquecimento prévio. A possibilidade de armazenamento e facilidade no transporte contribuem para diminuir o desperdício de massa asfáltica devido à logística no tempo de entrega e aplicação da mistura em campo.

Sousa *et al.* (2012) ressaltam que a RAR pode ser adicionada a qualquer tipo de mistura asfáltica usinada a quente e orientam sobre as seguintes utilizações em substituição de parte da massa de ligante asfáltico contido nos diferentes tipos de misturas:

(i) Misturas densas: até 20 % do teor de ligante da mistura;

(ii) Misturas SMA: até 30 % do teor de ligante da mistura;

(iii) Misturas descontínuas: até 40 % do teor de ligante da mistura;

(iv) Misturas abertas: até 50 % do teor de ligante da mistura.

Sousa *et al*. (2012) comentam que há um melhoramento significativo das propriedades do ligante, que pode ser observado quando a adição de RAR é superior a 15 %. Além disso, os autores também ressaltam que existe certa quantidade de adição do material a partir do qual não haverá ligante disponível na mistura de forma suficiente para envolver adequadamente os agregados, ou a viscosidade se torna demasiadamente elevada. Ainda segundo os autores, tal fato ocasiona um aumento do Volume de Vazios (Vv) e de Vazios no Agregados Minerais (VAM) na mistura compactada para além dos limites aceitáveis, podendo ocorrer ainda um envolvimento parcial dos agregados.

Encontros da comunidade que se dedica às pesquisas com utilização de asfalto borracha intituladas de *Rubberized Asphalt Rubber – RAR*, *Conferences* ou conferência do asfalto emborrachado ou ainda conferência do asfalto-borracha, ocorrem desde o ano 2000 e podem ser mencionados diversos estudos sobre a aplicação do material RAR em misturas asfálticas nas escalas campo e laboratório (Manica *et al.,* 2018; Silva *et al.*, 2018; Kumar *et al.*, 2018; Shah *et al.*, 2018; Alsaad *et al.*, 2018). No Brasil, os trabalhos de Nunes (2017) e Lopes *et al*. (2021), que são pesquisas da primeira autora deste artigo, representam a primeira aplicação do material em pesquisa de misturas asfálticas desenvolvidas em laboratório.

3 METODOLOGIA DE OBTENÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

As pesquisas de Nunes (2017) e Lopes *et al*. (2021) evidenciaram, para os materiais e condições ensaiadas, que a modificação por RAR em 30 % (em massa de ligante), tanto para as modificações realizadas no ligante base quanto na mistura asfáltica, apresentaram o melhor desempenho à fadiga. Dessa forma, no presente estudo, adotou-se tal proporção de modificação.

Para fins de comparação, foi idealizada a produção de uma Mistura de Controle (MAC), adotando a granulometria *gap-graded* e ligante CAP 50/70 sem modificação, e uma Mistura Asfalto-Borracha com RAR (MAB-R30), com a mesma granulometria *gap-graded*, ligante CAP 50/70 e adição de RAR na proporção de 30 % em massa de ligante.

A composição granulométrica *gap-graded* é comumente empregada nos estudos referentes à produção de misturas asfalto-borracha. Essa granulometria se caracteriza pela distribuição de forma descontínua dos agregados, contendo pouca ou nenhuma quantidade de uma ou duas frações miúdas, promovendo maior contato entre os agregados graúdos (Caltrans, 2003). O *Asphalt-Rubber Standard Practice Guide* (ARPG, 1989) *apud* Sousa *et al*. (2006) mostram que o AB apresenta melhor desempenho quando incorporado a uma mistura de granulometria graúda, com maiores valores de VAM, uma vez que o asfalto-borracha possui valores de viscosidade elevada quando comparado a um asfalto convencional.

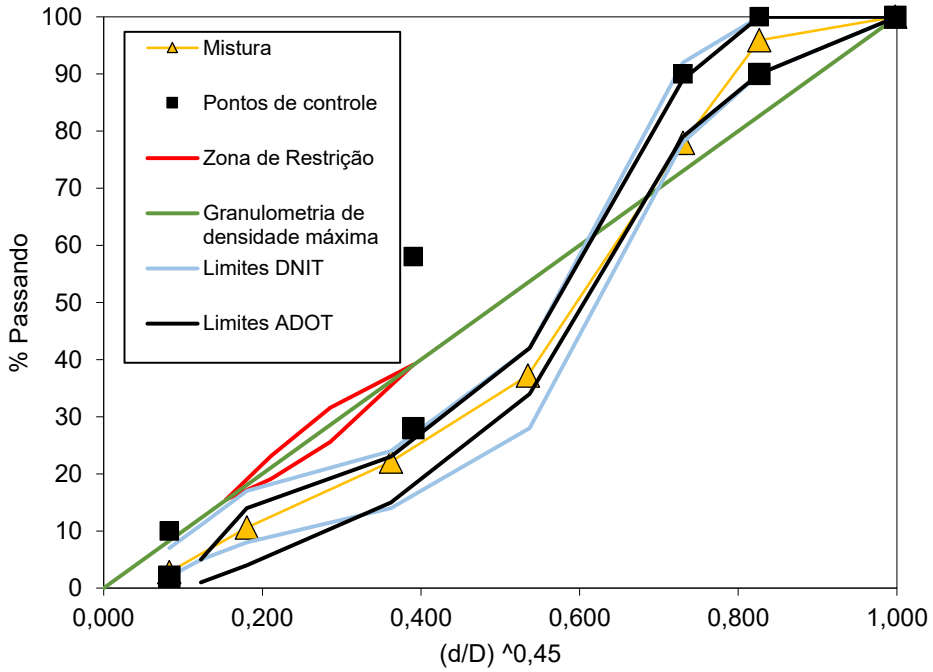
A composição granulométrica da mistura respeitou os limites mínimos e máximos da faixa descontínua recomendados pelo Departamento de Transporte do Arizona (ADOT) e pelo DNIT (DNIT 112/09–ES), como é apresentado na Tabela 1 e na Figura 1.

Tabela 1 – Distribuição granulométrica da mistura e faixas de limite do ADOT e DNIT

Tamanho da malha		d/D^0,45	Porcentagem passando (%)					Retida (%)
(")	(mm)		Limites ADOT		Limites DNIT		Mistura	
3/4"	19,1	1,00	100	100	100	100	100	-
1/2"	12,5	0,83	90	100	90	100	95,9	4,1
3/8"	9,5	0,73	79	89	78	92	77,9	18
N° 4	4,8	0,54	34	42	28	42	37,2	40,7
N° 10	2	0,36	15	23	14	24	22,1	15,1
N° 40	0,425	0,18	4	14	8	17	10,6	11,5
N° 80	0,18	0,12	-	-	5	11	-	7,8
N° 200	0,075	0,08	1	5	2	7	2,8	2,8

Fonte: ADOT e DNIT 112/09–ES (2009)

Figura 1 – Curva granulométrica adotada, limites máximo e mínimo segundo a faixa do DNIT, plotados juntamente com a curva de densidade máxima, pontos de controle e zona de restrição para o TNM de 12,5mm



Fonte: Elaboração própria

Para a mistura de controle, MAC, foram testadas as porcentagens de teor de projeto de 5,0; 6,5; 7,0 e 8,0 % de ligante. Para a mistura modificada com RAR, MAB-R30, foram testadas as porcentagens de teor de ligante de 6,0; 6,5; 7,0 e 8,0 %. A mistura depois de pronta foi mantida em estufa, a fim de simular o envelhecimento a curto prazo, por 2 horas, utilizando a mesma temperatura em que seria posteriormente compactada. Os moldes da compactação também foram inseridos na estufa à mesma temperatura. Foram produzidos no mínimo dois corpos de prova para cada teor, de cada mistura estudada, utilizando-se o molde de 150 mm de diâmetro. A Tabela 2 apresenta a configuração de temperaturas utilizada no processo de dosagem das misturas MAC e MAB-R30.

Tabela2 – Temperaturas de mistura e compactação para MAC e MAB-R

Temperaturas (°)	MAC	MAB-R30
Agregado	165	190
Ligante	155	165
Mistura e Compactação	140-150	150-165

Fonte: Elaboração própria

A cada ciclo de produção de mistura, a massa de CAP 50/70 a ser adicionada foi corrigida em relação à massa de agregado pesada pós-estufa. Para a mistura MAB-R30, a massa de CAP 50/70 a ser adicionada foi corrigida em relação à substituição por RAR em 30 % de massa de ligante. Por exemplo: considerando 100 % em massa de mistura, no teor de 8,0 % de ligante, para a adição de 30 % de RAR nesse teor (2,4 %), a massa de ligante foi corrigida para 5,6 %.

A adição de RAR foi feita diretamente no ato da mistura, após o envolvimento de todos os agregados pelo ligante, respeitando um intervalo de 2 a 3 minutos de duração do tempo total da mistura. A metodologia de adição de RAR à mistura difere da adotada em outras pesquisas encontradas. Shah *et al.* (2018) relatam a adição de RAR primeiramente aos agregados e posterior adição do ligante asfáltico à mistura. Entretanto, Sousa *et al*. (2012) recomendam o procedimento conforme realizado nesta pesquisa e em Nunes (2017).

Para a seleção do teor de projeto de ligante das misturas asfálticas foi estabelecido o Volume de Vazios (Vv) em 4,5 % e demais propriedades volumétricas dentro da faixa estipulada, conforme apresentado na Tabela 3. A Especificação de Serviço DNIT 112/09–ES regulamenta a produção de concreto asfáltico com asfalto-borracha, via úmida, do tipo *terminal blending*.

Tabela 3 – Propriedades volumétricas para misturas asfalto-borracha segundo DNIT 112/2009–ES

Propriedade	Limites (DNIT 112/09–ES)
Vv (%)	4-6
Teor de projeto (%)	5-8
VAM (%)	>14
RBV (%)	65-78

Fonte: DNIT 112/09–ES (2009)

4 METODOLOGIA DE QUANTIFICAÇÃO DA ESPESSURA DO FILME DE LIGANTE TF

Foi reconhecido que misturas produzidas com filmes de ligante asfáltico mais espessos resultam em pavimentos flexíveis e duráveis, enquanto as misturas de filmes finos tendem a trincar, reduzindo a vida útil dos pavimentos (Campen *et al.,* 1959). Convencionalmente, a espessura do filme de ligante é definida como uma razão entre o volume de asfalto que não foi absorvido pelas partículas do agregado e a área de superfície do agregado, sendo considerada uniforme para todas as partículas. A Equação 1 mostra como o cálculo é feito (Radovskiy, 2003):

$$TF = \frac{V_{asp}}{SA * W_{agg}} \quad (1)$$

Onde TF é a espessura do filme (m), $Vasp$ é o volume efetivo de ligante (m³), SA representa a área de superfície (m²/kg) e W_{agg} a massa do agregado (kg).

O conceito de espessura de filme de ligante

asfáltico foi validado experimentalmente usando análises microscópicas. Elseifi *et al*., 2008 relataram que os filmes de ligante para grandes partículas de agregado são de forma irregular e consistem em uma mistura do ligante com agregado fino e fíler. Os mesmos autores também verificaram que a espessura do filme pode ser superior a 100 μm para agregados mais graúdos e menor que 2 μm para pequenas partículas de agregado. É improvável que as partículas de uma mistura tenham espessuras de filme de ligantes uniformes. Para fins práticos, tem-se admitido que partículas muito pequenas (*fíler*) estão incorporadas ao filme, formando uma argamassa asfáltica (Kandhal e Chakraborty, 1996).

A RAR atua como um fíler seco e muito áspero, portanto torna-se extremamente importante verificar sua superfície específica gravimétrica (*SA*) e a espessura do filme de ligante quando ocorre a sua utilização. A metodologia utilizada neste artigo para obter TF foi a mesma utilizada por Shah (2018) e descrita com detalhe no trabalho de Nanjegowda *et al*. (2020). Segundo os autores, a RAR pode ser considerada interagindo como agregado ou como ligante dentro da mistura asfáltica, e tais considerações resultarão em diferentes TFs. A seguir é descrito um passo a passo sobre o ajuste granulométrico e obtenção da SA:

- Obter as porcentagens de asfalto e agregado que compõem a mistura asfáltica, com a correção do valor efetivo de ligante asfáltico a partir da adição de RAR (nesta pesquisa, em 8 % de ligante, sendo 2,40 % de RAR e 5,60 % de CAP 50/70 e 92 % de agregados);
- Ajustar a distribuição granulométrica dos agregados, considerando a correção da porcentagem de RAR;
- Ajustar o fator área de superfície SA_{Fi} específico para cada peneira, por meio da Equação 2:

$$SA_{Fi} = 1{,}93\,.\,p^{-1{,}0221} \quad (2)$$

Onde SA_{Fi} é o fator área de superfície de cada peneira, *p* é a porcentagem de agregado que passa na peneira, e $1{,}93e^{-1{,}0221}$ são constantes, considerando os valores tabelados, fornecido pelo MS-2 (Asphalt Institute, 2014).

- Obter o valor de $SA_{Agregados}$ por meio da Equação 3:

$$SA_{Agregados} = \sum p_i \,.\, \frac{SA_{Fi}}{100} \quad (3)$$

Em que $SA_{Agregados}$ é a área de superfície total dos agregados, p_i é a porcentagem passando em cada peneira e SA_{Fi} é o fator da área de superfície específica de cada peneira obtido da etapa anterior.

Após a obtenção de SA em função dos agregados, é necessário obter o valor de *SA* para o material RAR. Para isso, são realizados os mesmos passos anteriores, considerando o valor em porcentagem de RAR presente na mistura (2,40 %), a distribuição granulométrica da RAR e o seu fator de área de superfície SA_{FiRAR} específico de cada peneira é dado pela Equação 4:

$$SA_{FiRAR} = 10\,.SA_{Fi} \quad (4)$$

O valor de SA_{Fi}, para a RAR interagindo como agregado na mistura é dado pela Equação 5:

$$SA_{RAR-Agregado} = \sum p_i.\frac{SA_{Fi}}{100} + \left(cp_i.\frac{SA_{Fi}}{100} + ap_i.\frac{SA_{FiRAR}}{100}\right) \quad (5)$$

Onde $SA_{RAR-Agregado}$ é a área de superfície total do agregado combinado com a RAR, cp_i é o valor corrigido da porcentagem de agregado que passa em cada peneira, ap_i é o valor ajustado de RAR que passa em cada peneira e SA_{FiRAR} é o fator área de superfície da RAR como agregado passando em cada peneira.

Para a obtenção da SA da RAR combinada com o ligante, são realizados os seguintes

passos:

- Considerar a distribuição granulométrica da RAR obtida em Nanjegowda *et al*. (2020);
- Ajustar o fator área de superfície SA_{FRAR} específico para cada peneira, por meio da Equação 6:

$$SA_{FRAR} = 19{,}44 \,.\, p_{RAR}{}^{-1{,}0616} \quad (6)$$

Em que SA_{FRAR} é o fator área de superfície para os grãos de RAR, p_{RAR} é porcentagem de RAR que passa na peneira e *19,44* e *-1,0616* são constantes, considerando os valores tabelados, fornecido pela MS-2 (*Asphalt Institute*, 2014);

- Obter o valor de SA_{RAR} por meio da Equação 7:

$$SA_{RAR} = \sum SA_{FRAR} * \frac{Porcentagem\ de\ RAR\ na\ mistura}{100} \quad (7)$$

O valor de SA final, para a RAR combinada interagindo como ligante na mistura, é dado pela Equação 8:

$$SA_{RAR-Ligante} = SA_{Agregado} + SA_{RAR} \quad (8)$$

E assim, a espessura do filme de ligante, TF, pode ser calculada de duas formas, combinando a ação da RAR como agregado (Equação 9) e como ligante (Equação 10):

$$TF = \frac{V_{asp}}{SA_{RAR_agregado}.W_{agg}} \quad (9)$$

$$TF = \frac{V_{asp}}{SA_{RAR_ligante}.W_{agg}} \quad (10)$$

Onde TF é a espessura do filme (m), V_{asp} é o volume efetivo de ligante (m³), $SA_{RAR_Agregado}$ representa a área de superfície da RAR combinada com o agregado na mistura (m²/kg), $SA_{RAR_Agregado}$ representa a área de superfície da RAR combinada com o ligante na mistura (m²/kg) e W_{agg} a massa do agregado (kg).

Shah (2018) relata que certo fabricante, tendo por experiências projetos anteriores, recomenda uma espessura mínima de filme de 10 µm, e um fator de superfície, um multiplicador que permite calcular a SA da RAR no valor de 10, evitando, assim, aparecimento de trincas e desagregação na mistura asfáltica. Nanjegowda *et al*. (2019) estudaram resultados de espessura de filme de ligante em 18 misturas de diferentes granulometrias, sem modificação e modificadas com RAR e recomendam que o valor mínimo de TF seja de 12 µm.

4.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DA RAR POR MEIO DO ANALISADOR DE PARTÍCULAS

A RAR em seu estado físico antes da inclusão em misturas asfálticas é uma substância seca cinzenta/preta com uma densidade aparente de aproximadamente 0,6 g/cm³. Apresenta tamanhos de partículas individuais abaixo de 600 µm, concentrando grande parte destas na faixa de 250-600 µm (Plati e Cliatt, 2021).

A distribuição granulométrica da RAR pode ser encontrada no trabalho de Nanjegowda *et al*. (2020) em que os autores desenvolveram considerações sobre a forma de cálculo da espessura do filme de ligante ao se utilizar RAR em uma mistura. Essa abordagem foi explanada no item 4.

Uma vez que a RAR é composta por BMP, ligante asfáltico e fíler, materiais heterogêneos e que assumem diferentes dimensões após o processo de fabricação, a fim de se verificar a sua distribuição granulométrica, foi utilizado o analisador de partículas. Esse equipamento, fabricado pela MICROTRAC, possui um sistema de análise de partículas da série 5000 SYNC que é uma combinação de tecnologias que integra duas técnicas de medição ótica bem estabelecidas num único instrumento: análise de Difração a Laser (LD) e Imagem Dinâmica (DI), que permitem obter a distribuição estatística do tamanho e da forma das partículas.

Segundo o manual de operação e

manutenção que acompanha o instrumento, na análise por LD, a luz dispersa de múltiplos feixes de laser projetados por meio de um fluxo de partículas, é medido por matrizes de detetores óticos. Na análise DI, a luz obscurecida por um LED intermitente é posicionada atrás de um fluxo de partículas detectado por uma câmera de alta velocidade/ alta resolução.

O analisador SYNC capta essas duas medições, utilizando uma técnica patenteada que integra e sincroniza a coleção de luz das duas tecnologias simultaneamente por meio de uma única célula de medição. Utiliza-se um software, instalado junto ao equipamento, para analisar os resultados de cada técnica e apresentar os dados. Os dados podem ser analisados independentemente por tecnologia ou misturados num único dado de apresentação. O procedimento poderá ser realizado em meio seco ou úmido, dependendo das características da amostra e da configuração do sistema. Mostra-se, na Figura 2, o equipamento em que foram realizados os ensaios.

Figura 2 – a) Visão geral do equipamento analisador de partículas da Microtrac; b) Carregamento da amostra no equipamento para a análise das partículas de RAR

Fonte: Elaboração própria

Para se analisar as partículas de RAR, realizaram-se testes preliminares visando estabelecer as configurações do ensaio, segundo a aplicação de adequada taxa de fluxo no meio aquoso e aplicação de ultrassom, o que mantém o fluxo de partículas em meio aquoso e dispersa possíveis conglomerados de partículas (espécie de defloculante com ação física), respectivamente, melhorando a identificação dos tamanhos e formas.

Nesse estudo, foram investigados os tamanhos de partículas na faixa de valores entre 2000 μm e 0,02 μm com a configuração LD de três lasers vermelhos em meio úmido. Foi aplicada taxa de fluxo de 80 % e aplicação de ultrassom.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

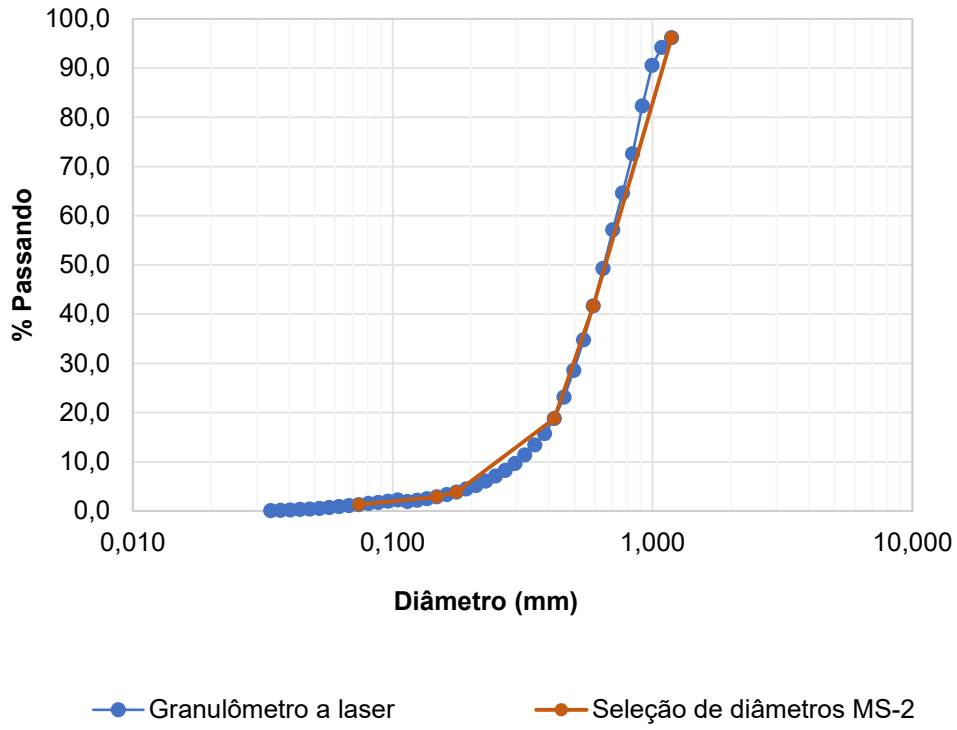
A seguir são apresentados e discutidos os resultados obtidos, destacando-se primeiramente a determinação do filme de ligante e o estudo de dosagem.

5.1 FILME DE LIGANTE TF

Ressalta-se que, para o cálculo da espessura do filme de ligante desenvolvido por Nanjegowda *et al*. (2020) em misturas que utilizam a RAR na composição, são considerados os valores tabelados de aberturas de malha de peneiras e as respectivas superfícies específicas, fornecidas pela MS-2 *Asphalt Institute* (2014). Dito isso, tendo em vista a curva granulométrica dos agregados utilizados na mistura e a curva granulométrica da RAR, merece atenção a sequência de peneiras que foram consideradas no cálculo: 4,75; 2,36; 1,18; 0,6; 0,3; 0,15 e 0,075 mm.

Uma etapa importante nos cálculos da espessura do filme de ligante foi a obtenção da curva granulométrica da RAR obtida por meio do analisador de partículas. Na Figura 3, são observadas a disposição de duas curvas granulométricas: (1) todos os tamanhos de diâmetros observados na RAR nos ensaios realizados no analisador de partículas; (2) tamanhos de diâmetros observados na RAR no ensaio do analisador de partículas, com seleção dos valores presente no MS-2 *Asphalt Institute* (2014).

Figura 3 – Distribuição granulométrica da RAR obtida por meio do analisador de partículas



Fonte: Elaboração própria

De acordo com as equações apresentadas no item 4, as espessuras do filme de ligante para a granulometria estabelecida, assim como a combinação $RAR_agregado$ e $RAR_ligante$ foram calculados. Na Tabela 4 e na Tabela 5 apresentam-se exemplos das planilhas utilizadas para o cálculo da espessura do filme de ligante TF.

Tabela 4 – Exemplo de cálculo de TF considerando $SA_{Agregado}$ e $SA_{RAR\text{-}Agregado}$ para 8,0 % de ligante sendo, 5,60 % de CAP50/70 e 2,40 % de RAR

Malha (mm)	% Passando Mistura	Ajuste granulométrico Agregados	SA_{FI} (MS-2; Asphalt Institute)	SA_{Agreg}	% RAR Passando	Ajuste granulométrico RAR	AS_{FIRAR}	$SA_{RAR\text{-}Agregado}$
19,1	100	97,6			-	-	-	
12,5	95,9	93,6	0,41	0,41	-	-	-	0,41
9,5	77,9	76,0			-	-	-	
4,8	37,2	36,3	0,4	0,14	-	-	-	0,14
2	22,1	21,6	1,0	0,21	-	-	-	0,21
1,18	-	-	1,6	-	96,2	2,3	16,25	0,38
0,6	-	-	3,3	-	41,7	1,0	30,93	0,31
0,425	10,6	10,3	4,6	0,49	18,8	0,5	49,00	0,70
0,18	-	-	11,2	-	3,9	0,1	122,93	0,11
0,15	-	-	13,4	-	2,9	0,1	147,76	0,10
0,075	2,8	2,7	27,3	0,76	1,3	0,0	308,41	0,84
$\sum SA_{Agregado}$				**2,02**	$\sum SA_{RAR\text{-}Agregado}$			**3,21**
TF				**43,03**	TF			**18,98**

Fonte: Elaboração própria

Tabela 5 – Exemplo de cálculo de TF considerando $SA_{RAR\text{-}Ligante}$ para 8,0% de ligante sendo, 5,60 % de CAP50/70 e 2,40% de RAR

Malha (mm)	(%) RAR Passando	$SA_{F\text{-}RAR}$	$AS_{\text{-}RAR}$
1,18	96,2	0,15	0,004
0,6	41,7	0,37	0,009
0,425	18,8	0,86	0,021
0,18	3,9	4,64	0,111
0,15	2,9	6,27	0,150
0,075	1,3	14,96	0,359
∑AS (Com RAR)			**2,67**
TF			**22,76**

Fonte: Elaboração própria

O procedimento exemplificado nas Tabelas 4 e 5 foi realizado para todos os teores de dosagem sendo os resultados resumidos na Tabela 6.

Tabela 6 – Resumo dos resultados de SA e TF para a etapa de dosagem das misturas asfálticas

MAC			MAB				
Teor (%)	SA (m²/kg)	TF (µm)	Teor (%)	RAR como agregado		RAR como ligante	
			-	SA (m²/kg)	TF (µm)	SA (m²/kg)	TF (µm)
5	2,02	26,05					
6,5	2,02	34,40	6	2,91	15,35	2,51	17,79
6,7	**2,02**	**35,54**	6,5	2,99	16,30	2,55	19,07
7	2,02	37,25	7	3,06	17,22	2,59	20,32
8	2,02	43,03	**8**	**3,21**	**18,98**	**2,67**	**22,76**

Fonte: Elaboração própria

Uma vez que a granulometria aplicada nas misturas foi fixada, a fim de se atingir o Vv e demais parâmetros volumétricos, é possível observar que, com o aumento do teor de ligante, há consequente aumento nos valores de TF para a dosagem MAC. Significa dizer que, dentro da mesma granulometria e $SA_{Agregado}$, o volume disponível de ligante asfáltico aumenta, aumentando o valor de TF nessas misturas. Observa-se que, para o teor de ligante de 6,7 % selecionado na MAC, o TF é de 35,54 µm.

Para as misturas MAB-R30, observa-se que os valores de $SA_{RAR\text{-}Agregado}$ são maiores em todos os teores quando comparado aos valores de $SA_{RAR\text{-}Ligante}$. Isso ocorre devido ao fato de $SA_{RAR\text{-}Agregado}$ ser a soma da área de superfície do agregado com a influência da RAR, atuando como um fíler, que, ao contrário da granulometria da mistura, apresenta frações nas peneiras de abertura 0,18 e 0,15 mm, o que aumenta o valor da área de superfície, consumindo parte do ligante, como é observado ao se comparar os resultados de espessura do filme de ligante, TF.

Ao considerar a RAR como ligante, apesar do alto valor de fator de área de superfície considerado para a RAR, a correção dos valores de SA_{RAR}, a partir da porcentagem de adição do material presente na massa total da mistura (2,40 % em 8,0 % de ligante), contribuem para um valor de $SA_{RAR\text{-}Ligante}$ menor, aumentando o TF apresentado na mistura.

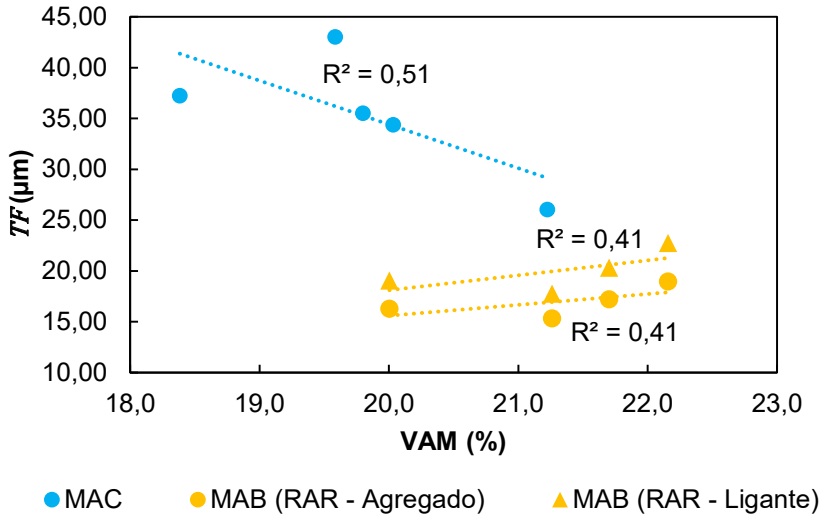
Com relação às espessuras do filme de ligante recomendadas por (Shah, 2018) e (Nanjegowda *et al*., 2020) para misturas modificadas com RAR, pode-se afirmar que a mistura MAB-R30 em seu teor de projeto definido na etapa de dosagem (8 %) atende aos valores de TF que recomendados, sendo estes de 10 e 12 µm, respectivamente.

Os autores (Kandhal e Chakraborty, 1996) indicam que a faixa ideal da espessura do filme de ligante seria entre 9 µm e 10 µm. A partir da metodologia proposta por Duriez, STP1147 (1992), a espessura do filme de ligante é obtida com base no método da superfície específica em que se aplica o módulo de riqueza (k), com um valor mínimo especificado. Vale mencionar que a espessura do filme de ligante não é tratada como um parâmetro da etapa de dosagem, sendo recomendada a sua análise e observação como um indicador de possíveis ocorrências nas misturas como um direcionador.

Na Figura 4 e Figura 5 apresentam-se as relações obtidas entre as propriedades volumétricas da dosagem VAM e RBV com a espessura do filme de ligante. De uma maneira geral observa-se que o VAM apresentou baixa correlação com os valores de TF, enquanto o RBV apresentou boa correlação com TF nas misturas estudadas. Na mistura MAC o aumento do teor de ligante causa o aumento de TF e diminuição dos valores de VAM. Isso é justificado pela maior quantidade de ligante na mistura, para um mesmo valor de superfície específica de agregado, fazendo com que o ligante aja de forma a reduzir o Vv. Nas misturas MAB-R30 se observa que ao contrário, há aumento nos valores de VAM e consequente aumento de TF, fato que representa a atuação da RAR nestas propriedades.

O RBV apresentou correlação direta com os valores de TF em ambas as misturas para os teores de dosagem testados. Tal fato é esperado dado que o aumento na espessura do filme de ligante representa sua maior disponibilidade na mistura, ocorrendo em menores valores na MAB-R30 quando considerado a interação RAR-agregado devido ao aumento da superfície específica da mistura.

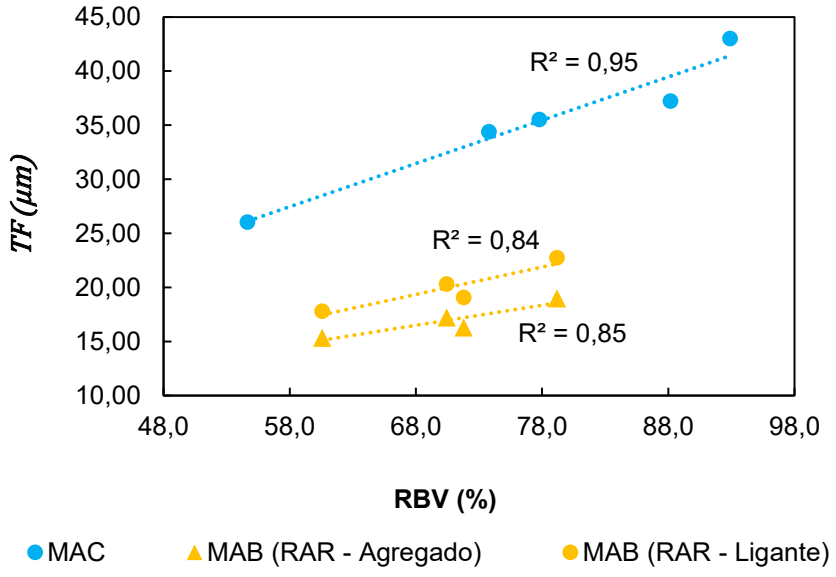
Figura 4 – Espessura do filme de ligante em função dos valores de VAM (%) das misturas



Fonte: Elaboração própria

Além de cumprir o valor estabelecido em pesquisas anteriores para o filme de ligante em misturas modificadas com RAR, os valores de TF encontrados também se encontram dentro da faixa de ocorrência estudada por Vieira *et al.* (2019). Os autores estudaram a espessura de filme de ligante em matriz de agregado fino tendo como resultado a maior ocorrência da espessura do filme entre 0 µm e 50 µm, apesar da não uniformidade de distribuição por toda amostra.

Figura 5 – Espessura do filme de ligante em função dos valores de RBV (%) das misturas



Fonte: Elaboração própria

Além de cumprir o valor estabelecido em pesquisas anteriores para o filme de ligante em misturas modificadas com RAR, os valores de TF encontrados também se encontram dentro da faixa de ocorrência estudada por Vieira *et al.* (2019). Os autores estudaram a espessura de filme de ligante em matriz de agregado fino tendo como resultado a maior ocorrência da espessura do filme entre 0 μm e 50 μm, apesar da não uniformidade de distribuição por toda amostra.

5.2 DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

O projeto das misturas MAC e MAB-R30 foi realizado testando os teores de ligante descritos no item 3. A metodologia seguiu o protocolo *Superpave*, segundo é descrito no documento MS-2 do Asphalt Institute (2014). São apresentados na Tabela 5 e na Figura 6 os valores dos parâmetros volumétricos de volume de vazios (Vv), vazios no agregado mineral (VAM), relação betume vazios (RBV) e densidade aparente são referentes a $Nprojeto$. Os valores de critério da Tabela 7 incluem as faixas consideradas pela especificação DNIT 112 e pelo manual do *Asphalt Institute*. Destaca-se que, para a produção de misturas asfálticas modificadas por RAR, foram encontrados trabalhos que utilizam a metodologia de dosagem *Superpave* (Shah *et al.*, 2018) e Marshall (Chavez et al, 2019).

Tabela 7 – Resumo das propriedades volumétricas nos projetos de dosagem das misturas MAC e MAB-R

Propriedade	MAC	MAB-R30	Critério
Vv (%)	4,5	4,5	4-6
Teor de projeto (%)	6,7	8	5-8
VAM (%)	19,8	22,2	>14
RBV (%)	77,8	79,2	65-78
% G_{mm} $N_{inicial}$	84,3	85,9	Máx 89

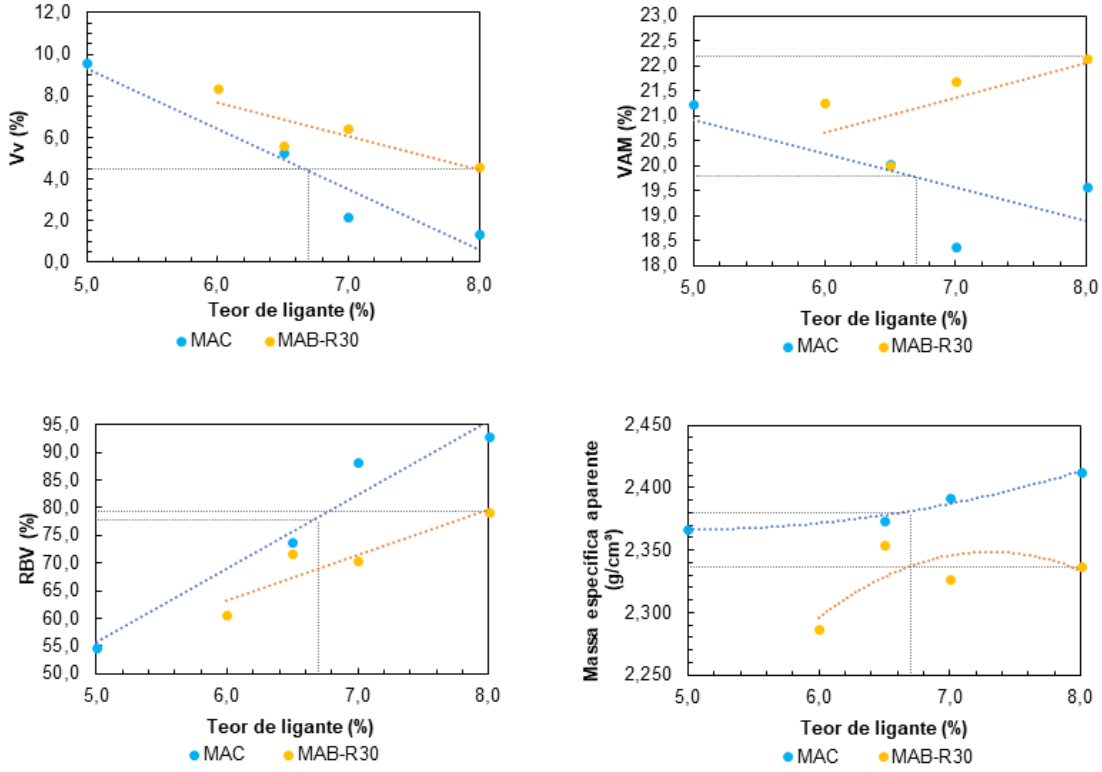
Fonte: Elaboração própria

O teor de projeto de ligante asfáltico obtido foi de 6,7 % para a mistura de controle e 8,0 % para a mistura modificada com RAR. No projeto de dosagem, buscou-se enquadrar os parâmetros volumétricos das misturas em faixas que obedecessem tanto aos critérios volumétricos da dosagem *Superpave* quanto da norma DNIT 119/2009–ES. Com relação ao teor de ligante, cabe lembrar que a referida norma estabelece limites para uso de asfalto-borracha do tipo *terminal blend*, o que difere da tecnologia utilizada. É comum que misturas AB, fabricadas por via úmida, consumam teores elevados de ligante asfáltico (Kaloush *et al*., 2002; Mello, 2008; Souza *et al*., 2012; Shah *et al*., 2018; Alsaad *et al.*, 2018).

A partir dos resultados obtidos para a mistura MAB-R30, é possível avaliar a coerência dos resultados obtidos empiricamente no processo de dosagem da mistura de controle MAC. Na confecção da mistura MAB-R30, como mencionado no item 3.5, considerando 100 % em massa de mistura, no teor de 8,0 % de ligante, para a adição de 30 % de RAR neste teor (2,4 %), a massa de ligante foi corrigida para 5,6 %. Como a RAR é composta também por ligante asfáltico na margem de 20 a 25 % no total de sua composição, é necessário considerar esta parcelar de ligante contribuindo para o teor de ligante total da mistura. Dessa forma, em 2,4 % de RAR, considerando o valor de 25 % de ligante em sua composição, obtém-se 0,6 % de ligante disponível para compor a mistura asfáltica. Assim, é possível afirmar que a mistura MAB-R30 contém 6,2 % de teor de ligante, em 100 % de massa de mistura, em que 5,6 % provêm da adição de CAP 50/70 e 0,6 % da composição da RAR.

Ao observar os resultados plotados na Figura 6, no que diz respeito aos valores de Vv versus teor de ligante, é possível concluir que os dados empíricos da mistura MAC, tendo mesma origem e lote os materiais aplicados na mistura MAB-R30, demonstram que o valor de 6,2 % de ligante corresponde a um Vv de 5,8 %. Essa ocorrência exclui a elegibilidade do teor de 6,2 % como teor de projeto para a mistura MAC.

Figura 6 – Parâmetros volumétricos da dosagem segundo a metodologia *Superpave* para as misturas MAC e MAB-R30



Fonte: Elaboração própria

Pode-se afirmar que, ao estabelecer o valor de Vv a 4,5 % nas misturas MAC e MAB-R, avaliando-se a introdução da RAR na etapa de dosagem, os resultados mostraram que:

- Ambas as misturas apresentam diminuição do Vv com o aumento do teor de ligante na dosagem, sendo que a mistura MAB-R30 apresenta maiores valores de Vv quando comparado a mistura MAC para os mesmos teores de ligante, o que corresponde à introdução da RAR na mistura. Tal fato é atrelado ao aumento da viscosidade promovido pela adição da RAR, tornando o processo de compactação mais trabalhoso;
- Uma vez que os valores de VAM dependem do Vv e dos Vazios com Betume (VCB), apesar de o volume efetivo de ligante aumentar em ambas as misturas, MAB-R30 apresentou maiores valores de VAM, uma vez que possui maiores valores de Vv. Vale lembrar que, para as misturas modificadas com ligante AB, é interessante a apresentação de elevados valores de VAM;
- Os valores de RBV correspondem à razão entre os valores de VCB e VAM. Como as misturas MAB-R30 apresentam maiores valores de VAM, consequentemente, são esperados menores valores de RBV;
- Os resultados da densidade aparente mostram que a introdução da RAR, que apresenta baixo valor de densidade aparente, sendo um material leve, faz com que esses valores na mistura MAB-R30 sejam menores que na mistura MAC em qualquer teor de ligante testado na etapa de dosagem.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa aplicou uma metodologia desenvolvida por (Nanjegowda *et al.*, 2020) visando à avaliação do filme de ligante TF em misturas asfálticas produzidas com a utilização de RAR. Dessa forma, tendo por base os resultados apresentados, pode-se concluir que:

- Foi possível observar que, com o aumento do teor de ligante, há consequente aumento nos valores de TF para a dosagem da MAC. Significa dizer que, dentro da mesma granulometria e $SA_{Agregado}$, o volume disponível de ligante asfáltico aumenta, aumentando o valor de TF nessas misturas;
- Para as misturas MAB-R30 observou-se que os valores de $SA_{RAR\text{-}Agregado}$ são maiores em todos os teores quando comparado aos valores de $SA_{RAR\text{-}Ligante}$. Isso ocorre devido ao fato de $SA_{RAR\text{-}Agregado}$ ser a soma da área de superfície do agregado com a influência da RAR, atuando como um fíler. Ao contrário da granulometria da mistura, esse apresenta frações nas peneiras de abertura 0,18 e 0,15 mm, o que aumenta o valor da área de superfície, consumindo parte do ligante, como é observado ao se comparar os resultados de espessura do filme de ligante, TF;
- (Shah, 2018) e (Nanjegowda *et al.*, 2020) recomendam que a TF das misturas produzidas com RAR seja de 10 e 12 µm, respectivamente;
- Esses valores, conforme (Nanjegowda *et al.*, 2020), possibilitam o bom desempenho de misturas asfálticas, evitando o surgimento de defeitos comuns em campo, como as trincas por fadiga e a desagregação da mistura;
- A aplicação da metodologia de verificação de TF proposta por Nanjegowda *et al.* (2019) resultou em um TF de 35,54 μm para a mistura convencional MAC. Para a mistura modificada com RAR o valor de TF foi de 18,98 µm para RAR atuando como agregado, e de 22,76 μm para RAR atuando como ligante;
- A determinação da superfície específica da RAR é etapa fundamental para o cálculo do filme de ligante. Destaca-se a importância do uso do analisador de partícula para a obtenção de dados de granulometria da RAR aplicados neste artigo;
- O teor de projeto de ligante asfáltico de 6,7 % para MAC e 8,0 % para MAB-R30 permitiu que as misturas apresentassem Vv de 4,5 %, como estabelecido, além de outras propriedades volumétricas apreciadas durante a dosagem dentro das faixas estabelecidas;
- Os teores determinados se encontram dentro da faixa esperada para o tipo de granulometria empregada. Além disso, os parâmetros volumétricos obtidos para MAB-R30 correspondem ao esperado para uma mistura AB.

O revestimento em concreto asfáltico é a camada mais nobre da estrutura do pavimento, tendo em vista que, comprovadamente, exerce maior influência de custo em obras rodoviárias. Portanto, diante dos resultados de dosagem, menciona-se que o aumento do teor de ligante em uma mistura com uso da RAR representará maiores gastos financeiros.

No entanto, é preciso considerar avaliações com relação à vida útil da camada de revestimento, comparando a utilização de MAC e MAB-R30. A MAB-R30 poderá apresentar ganhos quanto aos ciclos de manutenção e recuperação do pavimento, uma vez que se espera melhor desempenho à fadiga e deformação permanente. Portanto, a utilização de RAR demanda um maior investimento inicial na obra da rodovia, contudo poderá influenciar na redução de ciclos de intervenções no pavimento.

A avaliação quanto ao impacto financeiro do uso da RAR poderá ser realizada com a aplicação da metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) a partir de resultados de desempenho mecânico entre MAC e MAB-R30.

REFERÊNCIAS

ABDELRAHMAN, M. A.; CARPENTER, S. H. Mechanism of interaction of asphalt cement with crumb rubber modifier. **Transportation Research Record**, v. 1661, n. 1, p. 106-113, 1999.

ALSAAD, N.; MAHADI, V.; RICHARDS & KALOUSH, K. **Reacted and Activated Rubber (RAR) PG64-22 Binder Study**. Rubberized Asphalt Rubber 2018 - Proceedings, Kruger National Park, South Africa: p. 367-381, 2018.

ASPHALT INSTITUTE. **The Asphalt Handbook**. MS-4 Seventh Edition. USA. p. 788, 2007.

BAHIA, H. U., & DAVIES, R. Effect of crumb rubber modifiers (CRM) on performance related properties of asphalt binders. **Asphalt paving technology**, n.*63*, p. 414-414, 1994.

CAMARGO, F. F. **Field and laboratory performance evaluation of a field-blended rubber asphalt.** Tese de doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo, p. 161, 2016.

CHAVEZ, F., MARCOBAL, J., & GALLEGO, J. **Laboratory evaluation of the mechanical properties of asphalt mixtures with rubber incorporated by the wet, dry, and semi-wet process.** Construction and Building Materials, n. 205, p. 164-174, 2019.

DANTAS NETO, S. A. 2004. **Avaliação das Propriedades dos Ligantes e das Misturas Asfálticas Modificados com Borracha Granulada de Pneus Usados.** Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, p. 265.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT. **DNIT 112/2009–ES: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico com asfalto-borracha, via úmida, do tipo "*Terminal Blending*",** Rio de Janeiro, 2009.

FAXINA, A. L. **Estudo da viabilidade técnica do uso do resíduo de óleo de xisto como óleo extensor em ligantes asfalto-borracha.** Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação e Área de concentração em Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, (1): p. 303, 2006.

FONTES, L. P. **Optimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos**. 2009.

ELSEIFI, M.A., AL-QADI, I.L., YANG, S.H. and CARPENTER, S.H. **Validity of asphalt binder film thickness concept in hot-mix asphalt.** Transportation Research Record, *2057*(1), p. 37-45, 2008.

EPPS, J. A. Uses of recycled rubber tires in highways. **Transportation Research Board.** v. 198,1994.

KALOUSH, K. E., WITCZAK, M. W., WAY, G. B., ZBOROWSKI, A., ABOJARADEH, M. & SOTIL, A. **Performance Evaluation of Arizona Asphalt Rubber Mixtures Using Advanced Dynamic Material Characterization Tests**. Final Report, Department of Civil and Environmental Engineering, Arizona State University, Tempe, Arizona, July 2002.

KANDHAL, P. S., CHAKRABORTY, S. **Evaluation of voids in the mineral aggregate for HMA paving mixtures.** No. Report No. 9. National Center for Asphalt Technology, 1996.

KUMARA, S.; VENUDHARANB, V.; BILIGIRIC, K. P. & SOUSA, J. B. **Performance Characterization of Reacted and Activated Rubber Modified Gap-Graded Asphalt Mixtures.** Rubberized Asphalt Rubber 2018 - Proceedings, Kruger National Park, South Africa: p. 113-128, 2018.

LEITE, L. F. M. **Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímero.** Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano, IMA/UFRJ, Rio de Janeiro, 1999.

LOPES, L. N., DE FARIAS, M. M., & DE MELLO, L. G. R. Fatigue tests and damage analyses in modified binders and gap-graded asphalt mixtures with Reacted and Activated Rubber–RAR. **Road Materials and Pavement Design**, 22(7), p. 1616-1636, 2021.

LOPES, L. N. **Fadiga e Deformação Permanente em Ligante e Mistura Asfáltica Modificados com Borracha Pré-Tratada (RAR).** Tese de Doutorado, Publicação 176/2022 Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, p. 222, 2022.

MANICA, D.; MIRANDA, H.M.B. & SOUSA, J.B.3. **Case study: Development of a new bituminous mixture "ThinGap with Reacted and Activated Rubber for Madeira Island"**. Rubberized Asphalt Rubber 2018 - Proceedings, Kruger National Park, South Africa: p. 291-300, 2018.

BASTIDAS-MARTÍNEZ, J. G., RONDÓN-QUINTANA, H. A., & MUNIZ DE FARIAS, M. Behavior of asphalt mastics containing different materials as filler. **Canadian Journal of Civil Engineering**, 48(4), p. 347-355, 2021.

MELLO, L. G. R. **A Teoria do Dano em Meio Contínuo no Estudo da Fadiga em Misturas Asfálticas.** Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília/DF, p. 263, 2008.

NANJEGOWDA, V. H., SILVA, F., SOUSA, J. B., WAY, G. B., & BILIGIRI, K. P. Forensic approach to predict film thickness of reacted and activated rubber (RARX) modified asphalt mixtures. **Road Materials and Pavement Design**, 21(sup1), S19-S36, 2020.

NUÑEZ, J. **Caracterização à fadiga de ligantes asfálticos modificados envelhecidos a curto e longo prazo**. Ms Thesis, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, 2013.

NUNES, L. C. **Fadiga de Misturas Asfálticas Descontínuas com Asfalto-Borracha de 4ª Geração**. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-281/17, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, p. 142, 2017.

ODA, S. **Análise da viabilidade técnica da utilização do ligante asfalto-borracha em obras de pavimentação.** Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 2020.

PAMPLONA, Thaís F. *et al.* Asphalt binders modified by SBS and SBS/nanoclays: effect on rheological properties. **Journal of the Brazilian chemical society**, v. 23, p. 639-647, 2012.

PLATI, C., & CLIATT, B. Building Sustainable Pavements: Investigating the Effectiveness of Recycled Tire Rubber as a Modifier in Asphalt Mixtures. **Energies**, 14(21), 7099, 2021.

PINHEIRO, J. H. M. **Incorporação de Borracha de Pneu em Misturas Asfálticas de Diferentes Granulometrias (Processos Úmido e Seco).** Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 166 fl. 2004.

RADOVSKIY, B. Analytical formulas for film thickness in compacted asphalt mixture. **Transportation Research Record**, *1829*(1), p.26-32, 2003.

SALINI, R. B. **Utilização de Borracha Reciclada de Pneus em Misturas Asfálticas.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. p. 120, 2000.

SILVA, F.; MIRANDA, H.M.B. & SOUSA, J.B. **High performance mixtures: two new technologies brought together, ThinGap with RAR designed with i-Mix Design, a new mix design approach**. Rubberized Asphalt Rubber 2018 - Proceedings, Kruger National Park, South Africa: p. 265-275, 2018

SHAH, J.; SRINIVASAN, A. & KALOUSH, K. **RAR: Superpave Mix Design and Performance Testing.** Rubberized Asphalt Rubber 2018 - Proceedings, Kruger National Park, South Africa: p. 79-94, 2018.

SHATNAWI, S. **Comparisons of Rubberized Asphalt Binders Asphalt Rubber and Terminal Blend.** Shatec Engeneering Consultants, LLC. Eldorado Hills, California, 2011.

SOUSA, J. B., VOROBIEV, A., ISHAI, I., SVECHINSKY, G. Elastomeric Asphalt Extender – A New Frontier on Asphalt Rubber Mixes. **Asphalt Rubber 2012 – Proceedings**, Munich, Germany, p. 161-181, 2012.

SPECHT, L. P. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus.** Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2004.

TAKALLOU, H. B. & TAKALLOU M. B. Effects of mixing time and temperature on the visco-elastic properties of asphalt rubber binder. **Asphalt Rubber 2003 – Proceedings**, Brasília, Brazil, 2003, p. 589-602, 2003.

VIEIRA, L. H., OSMARI, P. H., ARAGÃO, F. T. S., SIMÃO, R. A., & DE REZENDE, L. R. **Procedimento experimental para a determinação da espessura do filme de ligante em matriz de agregado fino**. Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da Anpet, 33, Balneário Camboriú, Santa Catarina, 2019.

VISSER, A. T. & VERHAEGHE, B. Bitumen rubber: lessons learned in South Africa. **Asphalt Rubber 2000 – Proceedings**, Vilamoura, Portugal: p. 33-50, 2000.

WICKBOLDT, V. S. **Ensaios Acelerados de Pavimentos para Avaliação de Desempenho de Recapeamentos Asfálticos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, RS, 2005.

WU, C., SOUSA, J. B., LI A. & ZHAO, Z. **Activated Minerals as Binder Stabilizers in Middle Course's Asphalt Concrete Paving Mixtures**. 91st Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC, January 2014.

YILDIRIM, Y. Polymer modified asphalt binders. Departament of Civil Engineering, Texas University at Austin. **Construction and Building Materials**. (21): p. 66–72, 2007.

YINFEI, D.; JIAQI, C.; ZHENG, Z.; WEIZHENG, L. A review on solutions for improving rutting resistance of asphalt pavement and test methods. **Construction and Building Materials** v. 168: p. 893 – 905, 2018.

YUSSOF, N. **Modelling the Linear Viscoelastic Rheological Properties of Bituminous Binders.** PhD Thesis, University of Nottingham, UK. 2012.