

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO USO DE POLÍMERO SBS E DA FAIXA GRANULOMÉTRICA NOS PARÂMETROS DA DOSAGEM MARSHALL. ESTUDO DE CASO: PAVIMENTAÇÃO DO PROLONGAMENTO DA AVENIDA JOÃO PAULO II

Iury Euclides Maciel
Marcelo Figueiredo Massulo Aguiar
Universidade Federal do Pará Faculdade de
Engenharia Civil

RESUMO

Em obras rodoviárias é frequente o uso de diferentes tipos de ligante asfáltico e de faixas granulométricas para que a mistura asfáltica atinja os requisitos de projeto. O objetivo do trabalho é avaliar a influência do uso de polímero SBS e da faixa granulométrica (B ou C), nos parâmetros de dosagem Marshall. Para tal, foram utilizados diagramas de caixa e testes t de “Student”. Os principais resultados mostraram que o uso de polímero aumentou RBV e reduziu RTCD, fluência, VAM e volume de vazios. Ao mudar a faixa granulométrica, de faixa B para faixa C houve aumento de estabilidade e RBV e redução de fluência, VAM, volume de vazios e densidade aparente. Em verificação complementar, não foram encontradas correlações lineares válidas entre os parâmetros volumétricos (Teor de asfalto, densidade aparente, volume de vazios, VCB, VAM e RBV) e mecânicos (RTCD, estabilidade e fluência) para a maioria das misturas.

ABSTRACT

In road buildings, it is frequent to use different types of asphalt binder and aggregate gradation for an asphalt mixture to meet design requirements. The objective of this paper is to evaluate SBS polymer's and aggregate gradation's influences in the Marshall Mix Design parameters. For this, box plots and Student t tests were used. The main results showed that the use of SBS increased VFA and reduced ITS, flow, VMA and air voids. By changing the aggregate gradation, from range B to C, there was an increase in stability and VFA and reduction of flow, VMA, air voids volume and Gmb. In addition, no linear correlation was found between the volumetric parameters (asphalt content, bulk density, air voids, VFA, VMA) and mechanical parameters (ITS, stability and flow) for most mixtures.

1. INTRODUÇÃO

Para garantir a qualidade dos pavimentos, é importante assegurar a realização de um controle tecnológico eficiente, aliado a técnicas de execução de acordo com normas e escolha de materiais (FONSECA, 2016). Os dados obtidos por meio deste devem constituir um fator fundamental para análises críticas sobre os materiais e procedimentos utilizados. Na elaboração e execução de pavimentos, é possível elencar fatores que variam para atender as finalidades de projeto, tais como a adição de polímeros para a obtenção de melhor desempenho no pavimento e aumento de 40% na sua vida útil (MARQUES & AMADOR II, 2017) e a utilização de seixo, ao invés de brita que é amplamente utilizada no resto do país, com diferentes faixas granulométricas para adquirir maior resistência a deformações permanentes nas misturas asfálticas (MUGAYAR, 2004). Ambos podem ser melhor analisados pelos resultados de parâmetros da dosagem Marshall como (Vazios de Agregado Mineral (VAM), Relação Betume Vazios (RBV), Volume de Vazios (VV), Estabilidade, Fluência e Resistência à Tração (RT))

Esses dois fatores (adição de polímero e uso de diferentes faixas granulométricas) foram utilizados em uma das mais recentes obras de infraestrutura inaugurada na região Metropolitana de Belém, o Prolongamento da Avenida João Paulo II. Uma avenida localizada no entorno do Parque Ambiental do Utinga (PEUt) com o objetivo de ser uma alternativa para a BR-316, na entrada de Belém, promovendo um melhor fluxo de veículos e mobilidade urbana na Região Metropolitana, a qual obteve um crescimento de 115,5% no número de

veículos nos últimos 10 anos (DENATRAN, 2017). A obra é constituída por duas pontes ao longo de 4,72 Km de extensão, além de duas vias auxiliares para a conexão com a BR-316. O pavimento flexível utilizado é constituído por dois tipos camadas de concreto asfáltico para alcançar a qualidade desejada: camada de Faixa B, conhecido também como camada de ligação ou Binder, e de Faixa C, conhecida também como camada de rolamento.

Os objetivos principais desta pesquisa são avaliar a influência do tipo de ligante asfáltico, em 2 níveis, com ou sem polímero, e da faixa granulométrica, também em 2 níveis, utilizando a faixa granulométrica B e C, nos parâmetros das dosagens Marshall, tais como estabilidade, fluência, VAM, RBV, Vv, Densidade aparente e Resistência à tração, além de realizar a correlação entre os resultados dos parâmetros volumétricos e mecânicos obtidos. Essa avaliação será feita mediante análises estatísticas dos dados obtidos a partir dos ensaios de controle tecnológico da qualidade do Concreto Asfáltico aplicado ao longo do Prolongamento da Avenida João Paulo II.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Polímeros

Os polímeros são substâncias macromoleculares com centenas ou milhares de átomos, extraídas da natureza ou artificialmente, pela união em rede ou estrutura de rede de pequenas moléculas, denominadas monômeros (ZEGARRA, 2007). Entretanto, não são todos os polímeros que podem ser adicionados no ligante e nem todo ligante estabiliza o polímero quando estocado. A quantidade de polímero adicionada ao ligante é variável e depende das propriedades finais desejadas, além de verificar a sua dispersão no CAP e como a matriz polimérica fixa na estrutura do asfalto (BERNUCCI et al., 2008).

Os polímeros são classificados em plásticos, elastômeros, fibras e aditivos, dentro desses ainda existe a subdivisão dos plásticos em termoplásticos e termorrígidos e a subdivisão dos elastômeros em borracha natural e sintética. No grupo de polímeros termoplásticos mais utilizados em modificação de ligantes está o *Styrene-butadiene-styrene* (SBS), em português estireno-butadieno-estireno, um polímero sintético do tipo elastômero.

A Figura 1 apresenta o polímero que é adicionado ao CAP quente, dissolvendo os domínios de poliestireno para que assumam características termoplásticas, as quais facilitam a operação de mistura e compactação. Mas, ao esfriar, os domínios de poliestireno retornam ao estado inicial, garantindo propriedades de resistência e elasticidade no ligante.



Figura 1: Polímero SBS

Os polímeros podem afetar algumas das seguintes propriedades dos ligantes, segundo Freitas

(1996):

- Susceptibilidade térmica: sendo reduzido com a utilização do polímero, aumentando a amplitude entre a fragilidade ao frio e o amolecimento ao quente;
- Coesão: Aumento da coesão e/ou faixa de coesão obtendo uma consistência melhor em qualquer temperatura de serviço;
- Elasticidade: Aptidão a resistência causada pelos efeitos do tráfego e das variações de temperatura;
- Resistência a fadiga: Resistência a solicitações repetidas, como o caso do tráfego constante de veículos.

Segundo Yildirim (2007), o SBS é um dos polímeros mais indicados como modificadores, apesar de haver uma limitação econômica. Este polímero apresenta um comportamento plástico em altas temperaturas e elástico em baixas, sendo tal fenômeno reversível. Sendo este efeito ressaltado por Balbo (2007), pois em baixas temperaturas o SBS faz com que o CAP diminua a rigidez e aumente a ductilidade, evitando rupturas frágeis, e em altas temperaturas quando ultrapassa o ponto de amolecimento do CAP, o polímero mantém o fluxo viscoso no ligante ao se permanecer sólido.

Além disso, o SBS apresenta melhoras na flexibilidade, resistência à deformação permanente de misturas asfálticas, diminuição na susceptibilidade térmica e aumento na estabilidade mecânica (MUGAYAR, 2004). Amaral (2000) e Zegarra (2007) relatam que há um desempenho superior das misturas modificadas com polímero SBS quando analisado em relação aos resultados das propriedades mecânicas dos ensaios Marshall, em relação ao uso de misturas de mesma classificação e sem polímero.

Marques e Amador II (2017) mostraram em seu trabalho que o ligante asfáltico com polímero utilizado na obra de Prolongamento da Avenida João Paulo II apresenta benefícios como: Redução de suscetibilidade térmica, melhoras nas características adesivas e coesivas, elevação do ponto de amolecimento e maior resistência a deformação permanente.

2.2. A importância da faixa granulométrica

As misturas asfálticas a quente podem ser classificadas em três grupos quanto a sua granulometria e fileres, tal classificação é descrita por Bernucci et al., (2008). As misturas com graduação densa possuem uma curva granulométrica contínua e bem graduada, proporcionando uma menor quantidade de vazios; As misturas com graduação aberta possuem uma curva granulométrica uniforme e com agregados na sua maioria de mesmo tamanho, garantindo uma maior quantidade de vazios já que não possuem material fino para seu preenchimento; E as misturas com graduação descontínua possuem maior quantidade de grãos maiores com quantidade de finos, provocando uma curva granulométrica descontínua garantindo uma maior resistência à deformação, porém tendem a ser instáveis.

Cada mistura possui as suas tolerâncias quanto a granulometria para ser classificada entre os diferentes tipos de camadas. Entretanto, a escolha dos agregados para a mistura não é somente para a classificação das camadas de revestimentos, estes também podem possuir diferentes níveis de desempenhos em serviço, sendo classificada na pavimentação quanto a sua natureza (natural, artificial ou reciclado), tamanho (gráudo, miúdo ou fíler) e distribuição de grãos (densa, aberta, uniforme e descontínua) (BERNUCCI et al., 2008).

A distribuição granulométrica dos agregados influi efetivamente no comportamento dos revestimentos asfálticos, como nos resultados das propriedades de rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, resistência à deformação permanente, entre outras (BERNUCCI et al. 2008). Por este motivo, a norma DNIT 031/2006 e a DNER 385-ES estabelecem, para cada tipo de camada, diferentes resultados para porcentagem de vazios, RTCD e RBV, além de estabelecer apenas um valor mínimo para estabilidade.

Nos resultados obtidos por Mugayar (2004), pode-se afirmar quanto a faixa granulométrica: A faixa granulométrica C utiliza maior quantidade asfalto para atingir o teor ótimo se comparado a faixa B. Quando utilizada a faixa B, os resultados de densidade aparente, volume de vazios e RBV são muito próximos, independentemente do tipo de ligante usado; e os resultados de fluência e de deformação final são afetados pela distribuição granulométrica.

3. MÉTODO

3.1. Caracterização da área de estudo

A obra de prolongamento da Avenida João Paulo II, iniciada em 17 de julho de 2013 e inaugurada no dia 28 de outubro de 2018, foi desenvolvida no entorno do Parque Ambiental do Utinga, ligando o, até então, final da Avenida João Paulo II até o viaduto do Coqueiro na BR-316, totalizando 4,72 Km de extensão de via pavimentada. Para melhor integrar a avenida com a BR-316, também foram executadas duas vias auxiliares: Rua Moça Bonita e Pedreirinha. Outro aspecto importante do projeto é a implantação de duas pontes, sobre os lagos Bolonha e Água Preta do Parque Ambiental do Utinga. Na Figura 2 é possível verificar que a Avenida João Paulo II é uma alternativa para a entrada no município devido a sua direção semelhante, de forma paralela a BR-316, mas possuindo uma formação mais sinuosa por se adequar ao PEUt.



Figura 2: Mapa de localização da obra

O projeto de pavimentação estipulou algumas mudanças quanto à composição do pavimento flexível da avenida, ou via principal, para as vias auxiliares. A via principal é composta por quatro camadas: Reforço do subleito, sub-base, base e concreto asfáltico, sendo este último subdividido em duas camadas de ligação com polímero e uma camada de rolamento com polímero. Já as vias auxiliares são compostas por três camadas: Sub-base, base e concreto asfáltico, sendo este subdividido em uma camada de ligação sem polímero e uma camada de rolamento sem polímero.

3.2. Dados e análise estatística

Os dados para a realização deste trabalho foram fornecidos pelo NGTM e Construções e Comércio Camargo Corrêa, a gerenciadora e executora da obra de prolongamento da Avenida João Paulo II, respectivamente. Com a execução do controle tecnológico, pela construtora, foi obtido o banco de dados dos resultados dos ensaios normativos para os serviços de pavimentação, com corpos de prova executados a partir da massa asfáltica produzida pela usina de mistura asfáltica.

Na obra, foram utilizados quatro tipos de misturas, que variavam quanto à faixa granulométrica utilizada (Faixa B ou Faixa C) e em relação ao uso ou não de polímero no asfalto. Assim, é possível entender melhor como os dois fatores proporcionam as misturas por meio de a Figura 3, além de atribuir nomes para cada uma com o objetivo de facilitar a citações ao decorrer do trabalho.

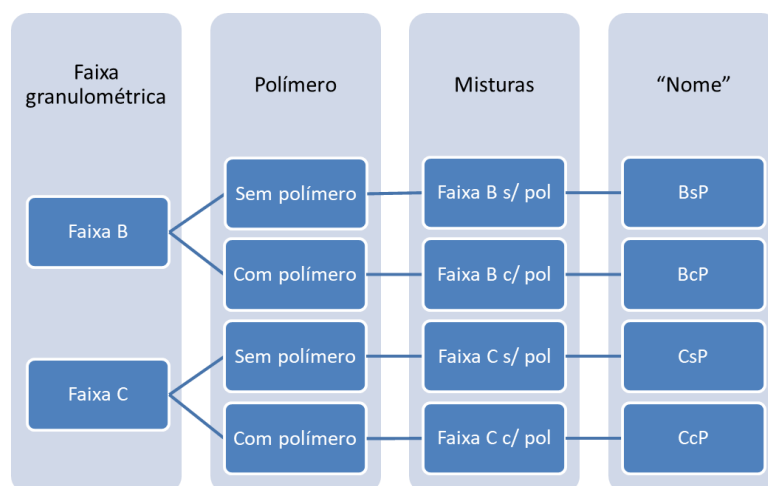


Figura 3: Histograma das misturas utilizadas

Na Tabela 1 estão apresentados os valores médios dos teores de ligantes obtidos para cada mistura. Nos ensaios realizados, verificou-se que a tolerância normativa de $\pm 0,3$ pontos percentuais em relação ao teor de ligante asfáltico foi atendida. Além disso, estão apresentados os valores de teor de vazios para cada mistura.

Tabela 1: Teor de ligante por mistura

Mistura	Teor de ligante (%)	Teor de vazios (%)
BsP	4,50	5,00
BcP	4,41	4,80
CsP	5,49	3,50
CcP	5,49	3,50

Como cada mistura foi elaborada para ser aplicada em situação específica, existe uma variação quanto à quantidade de ensaios realizados para cada. Além disso, não é possível realizar todos os ensaios de propriedades mecânicas no mesmo corpo-de-prova, ou seja, ou se obtém a Resistência à Tração ou se obtém a Estabilidade e Fluência da amostra, visto que estes ensaios são destrutivos.

3.3. Análise estatística

Utilizando os dados obtidos a partir do controle da obra, aplicaram-se estudos estatísticos para

identificar como a escolha da faixa granulométrica e o uso de polímero nos ligantes asfálticos podem influenciar nos parâmetros das dosagens Marshall.

3.3.1. Diagrama de caixa

O diagrama de caixa foi utilizado para realizar a comparação na dispersão dos resultados e a localização de “outliers” de cada mistura, sendo assim possível analisar a influência na modificação de cada fator e posteriormente realizar a exclusão dos valores discrepantes.

2.3.2. Teste t de “Student”

O teste t de “Student” foi utilizado para verificação entre as médias de duas variáveis, sendo possível definir, após descartar os valores “outliers” localizados pelo diagrama de caixa, se houve uma diferença significativa entre as médias obtidas para cada parâmetro entre as diferentes misturas, par a par, modificando apenas um fator por vez (tipo de ligante ou faixa granulométrica), possibilitando concluir sobre cada fator.

3.3.3. Correlação linear

A correlação linear foi usada para avaliar a intensidade de correlação entre dois conjuntos de dados, sendo sempre entre um parâmetro volumétrico, o qual pode ser mensurado aplicando fórmulas com as massas dos corpos de prova, e um parâmetro mecânico, o qual é mensurado por meio de aparelhos apropriados, para identificar as correlações entre os parâmetros obtidos em cada tipo de mistura.

Os motivos da associação entre estes dois conjuntos de dados são que: Entre os parâmetros volumétricos já existe uma correlação matemática, pois todos são provenientes de fórmulas que utilizam as massas dos CPs; Não é possível correlacionar parâmetros mecânicos, pois são avaliados por ensaios destrutivos, não sendo possível utilizar o mesmo corpo-de-prova para mensurar dois parâmetros distintos; e para possibilitar inferir sobre o comportamento mecânico, de maneira rápida e com apenas uma balança, sem a necessidade de equipamentos específicos. A Tabela 2 indica a interpretação da correlação a partir do resultado obtido.

Tabela 2: Interpretação dos dados obtidos na correlação linear

Valor de R (Positivo ou negativo)	Interpretação de correlação
0,00 a 0,19	Bem fraca
0,20 a 0,39	Fraca
0,40 a 0,69	Moderada
0,70 a 0,89	Forte
0,90 a 1,00	Muito forte

4. RESULTADOS

4.1 Avaliação da influência do uso de polímero SBS e da faixa granulométrica nos parâmetros da dosagem Marshall

Na Tabela 3 são apresentados os dados obtidos pelas análises estatísticas de cada parâmetro da dosagem Marshall por tipo de mistura, quantidade de amostras utilizadas para o cálculo, após retirar os dados com valores discrepantes identificados pelo diagrama de caixa, devido a possíveis erros na execução dos ensaios, no processo de usinagem e na má compactação, para obter maior precisão nos resultados, além de apresentar os resultados obtidos depois de realizado o teste t de *Student*, comparando os resultados de cada parâmetro entre duas misturas, as quais podem variar quanto ao tipo de ligante ou faixa granulométrica, sendo colocadas em verde as médias significativamente diferentes entre si e em vermelho as médias

que não são significativamente diferentes entre si.

Tabela 3: Resultados estatísticos dos parâmetros Marshall

	MISTURA	Média	Qtd	BcP	CsP	CcP		MISTURA	Média	Qtd	BcP	CsP	CcP
RTCD (Mpa)	BsP	0,98	(23)			-	ESTABILIDADE (Kgf)	BsP	1293,44	(22)			-
	BcP	0,85	(131)	-	-			BcP	1282,58	(123)	-	-	
	CsP	0,93	(65)	-	-			CsP	1321,78	(66)	-	-	
	CcP	0,90	(174)	-	-	-		CcP	1378,65	(165)	-	-	-
FLUENCIA	BsP	3,62	(23)			-	% V.A.M.	BsP	15,12	(46)			-
	BcP	3,62	(129)	-	-			BcP	14,81	(258)	-	-	
	CsP	3,49	(66)	-	-			CsP	16,65	(131)	-	-	
	CcP	3,55	(175)	-	-	-		CcP	16,40	(344)	-	-	-
% R.B.V.	BsP	68,30	(46)			-	% VAZIOS	BsP	4,83	(46)			-
	BcP	68,90	(259)	-	-			BcP	4,61	(259)	-	-	
	CsP	74,75	(134)	-	-			CsP	4,23	(131)	-	-	
	CcP	76,01	(352)	-	-	-		CcP	3,98	(349)	-	-	-
DENSIDADE APARENTE	BsP	68,304	(23)			-							
	BcP	68,900	(131)	-	-								
	CsP	74,755	(65)	-	-								
	CcP	76,010	(174)	-	-	-							

Na comparação dos resultados de Resistência à Tração por Compressão Diametral entre os tipos de misturas utilizados, foi possível identificar que o uso de polímero provocou a diminuição do valor da média entre as misturas que utilizam à mesma faixa granulométrica, em 13,26% da mistura BsP para BcP e em 3,22% da mistura CsP para CcP, diminuindo em média 8,24% na média da RTCD. Houve maior variação de RTCD entre as misturas que utilizaram a faixa B, já na faixa C o uso de polímero provocou uma variação menos significante. Sendo este um resultado incoerente, pois o uso de polímero deveria aumentar os resultados de RTCD, conforme relatado por Amaral (2000) e Zagarra (2007).

Quanto à mudança da faixa granulométrica, não foi possível identificar uma tendência de comportamento, pois nas misturas sem polímero houve diminuição de 5,10% na média da mistura BsP em relação a CsP e nas misturas com polímero houve um aumento de 5,88% na média da mistura BcP em relação a CcP. Sendo este um resultado coerente, pois a mudança da faixa granulométrica não altera o valor mínimo exigido de RTCD segundo as normas DNIT 031/2006-ES e DNER 385/99. Todas as médias foram consideradas significativamente diferentes entre si, logo pode concluir que os fatores mudança de ligante e faixa granulométrica alteram significativamente a média dos resultados de RTCD.

Em relação à estabilidade, não foi possível identificar uma tendência de comportamento nas misturas quanto ao uso de polímero, pois nas misturas com a Faixa B houve uma diminuição de 0,84% na média da mistura BsP em relação a BcP e nas misturas com a Faixa C houve o um aumento de 4,30% na média da mistura CsP para CcP. Sendo este um resultado coerente com Zagarra (2007), parcialmente coerente com Magayar (2004) e incoerente Amaral (2000),

pois estes relatam: Conforme Zagarra (2007), o uso de asfalto modificado com polímero apresentam maiores valores de estabilidade Marshall em seus testes com misturas com granulometria enquadrada na Faixa C; Conforme Mugayar (2004) há um aumento pouco significativo de estabilidade nas misturas que utilizam Faixa B com o uso de misturas com SBS em relação ao asfalto tradicional, e não há uma tendência de comportamento clara com as misturas que utilizam Faixa C, pois essas apresentam maiores valores de estabilidade da mistura com SBS em relação a mistura tradicional somente quando os teores de asfalto são superiores a 5%; E conforme Amaral (2000), o uso de polímero provoca o aumento dos valores de estabilidade nas misturas que utilizam a Faixa C, exceto quando o teor de ligante é superior a 5,5%, que é quando ocorre uma inversão no comportamento.

Quanto à mudança da faixa granulométrica, foi possível identificar que o uso da Faixa C em substituição a Faixa B provocou o aumento dos valores médios de estabilidade entre as misturas que utilizam o mesmo ligante, em 2,19% da mistura BsP para CsP e em 7,49% da mistura BcP para CcP, aumentando em média 4,84% na média da estabilidade. Sendo este resultado coerente, conforme as normas DNIT 031/2006-ES e DNER 385/99 que não alteram o valor mínimo de estabilidade na mudança da faixa granulométrica. Não foi possível concluir se os fatores mudança de ligante e faixa granulométrica alteram significativamente a média do resultado de estabilidade.

Para a fluência, foi possível identificar que o uso de polímero não provocou alteração no valor da média da mistura BsP para BcP e houve um aumento de 1,72% na média da mistura CsP para CcP, aumento em média 0,86% na média da Fluência. Sendo este um resultado parcialmente coerente com Mugayar (2004) e incoerente com Amaral (2000) e Zagarra (2007), pois estes relatam: Amaral (2000), até 5% de teor de asfalto para misturas de Faixa C com polímero há o aumento do valor de fluência, após essa porcentagem de teor ocorre o inverso; Segundo Mugayar (2004), até 5,5% de teor de asfalto para misturas de Faixa B com polímero há o aumento do valor de fluência, após essa porcentagem de teor ocorre o inverso e para misturas com Faixa C a fluência sempre é maior em misturas com o SBS; E segundo Zagarra (2007), o acréscimo de polímero no ligante das misturas com Faixa C apresentou a diminuição da Fluência.

Quanto à mudança da faixa granulométrica, foi possível identificar que o uso da Faixa C em substituição a Faixa B provocou a diminuição das médias entre as misturas que utilizam o mesmo ligante, em 3,60% da mistura BsP para CsP e em 1,94% na média da mistura BcP para CcP, diminuindo em média 2,77% na média da fluência. Sendo este resultado coerente, conforme a norma DNER 385/99 que não altera o valor da faixa de fluência na mudança da faixa granulométrica e a norma DNIT 031/2006 não estabelece padrões para tal resultado. Todas as médias foram consideradas não significativamente diferentes entre si, logo nem o fator mudança de ligante e nem a alteração da faixa granulométrica afetam a média dos resultados de fluência.

Na comparação dos resultados de vazios do agregado mineral entre os tipos de misturas utilizados, foi possível identificar que o uso de polímero provocou a diminuição do valor da média entre as misturas que utilizam à mesma faixa granulométrica, em 2,05% da mistura BsP para BcP e em 1,50% da mistura CsP para CcP, diminuindo em média 1,78% na média da VAM. Sendo este um resultado incoerente com Magayar (2004) e Zagarra (2007), pois relatam: Conforme Mugayar (2004), não há tendência no comportamento quanto a misturas

com Faixa B e há uma diminuição de VAM com o aumento de teor de ligantes em misturas de Faixa C com polímero; e conforme Zegarra (2007) há o aumento de VAM quando adicionado polímero em misturas de Faixa C a partir de 5% de teor de ligante. Uma possível explicação para as misturas com polímero terem apresentado menor RT é a maior dificuldade na execução/trabalhabilidade da mistura o que pode resultar em menor compactação da mistura asfáltica.

Quanto à mudança da faixa granulométrica, foi possível identificar que o uso da Faixa C em substituição a Faixa B provocou o aumento das médias entre as misturas que utilizam o mesmo ligante, em 10,12% da mistura BsP para CsP e em 10,74% da mistura BcP para CcP, aumentando em média 10,43% na média do VAM. Sendo este resultado coerente, conforme Mugayar (2004) e nas normas DNIT 031/2006-ES e DNER 385/99 não são estabelecidos padrões de resultado. As médias foram consideradas significativamente diferentes entre si, exceto pelo par BsP e BcP, logo é possível afirmar que apenas o fator mudança na faixa granulométrica afeta significativamente a média do VAM.

No que tange ao RBV, foi possível identificar que o uso de polímero provocou o aumento do valor da média entre as misturas que utilizam à mesma faixa granulométrica, em 0,89% da mistura BsP para BcP e em 1,69% da mistura CsP para CcP, aumentando em média 1,29% na média da RBV. Sendo este um resultado coerente conforme Amaral (2000), enquanto Mugayar (2004) e Zegarra (2007) afirmam que não há mudança no RBV quando modificado o tipo de ligante.

Quanto à mudança da faixa granulométrica, foi possível identificar que o uso da Faixa C em substituição a Faixa B provocou o aumento das médias entre as misturas que utilizam o mesmo ligante, em 9,44% da mistura BsP para CsP e em 10,32% da mistura BcP para CcP, aumentando em média 9,88% na média do RBV. Sendo este resultado coerente, conforme Mugayar (2004) e com as normas DNIT 031/2006-ES e DNER 385/99, as quais estabelecem faixa de maiores resultados para a camada de rolamento (Faixa C) do que para a camada de ligação (Faixa B). As médias foram consideradas significativamente diferentes entre si, exceto pelo par BsP e BcP, logo é possível afirmar que apenas o fator mudança na faixa granulométrica afeta significativamente a média do RBV.

Na comparação dos resultados de volume de vazios entre os tipos de misturas utilizados, foi possível identificar que o uso de polímero provocou a diminuição do valor da média entre as misturas que utilizam à mesma faixa granulométrica, em 4,56% da mistura BsP para BcP e em 5,91% da mistura CsP para CcP, diminuindo em média 5,24% na média do Vv. Sendo este um resultado coerente, conforme Amaral (2000), enquanto Mugayar (2004) e Zegarra (2007) afirmam que não há mudança no Vv quando modificado o tipo de ligante.

Quanto à mudança da faixa granulométrica, foi possível identificar que o uso da Faixa C em substituição a Faixa B provocou a diminuição das médias entre as misturas que utilizam o mesmo ligante, em 12,42% da mistura BsP para CsP e em 13,67% da mistura BcP para CcP, diminuindo em média 13,05% na média do Vv. Sendo este resultado coerente, conforme as normas DNIT 031/2006-ES e DNER 385/99, as quais estabelecem faixa de menores resultados para a camada de rolamento (Faixa C) do que para a camada de ligação (Faixa B). As médias foram consideradas significativamente diferentes entre si, exceto pelo par BsP e BcP, logo é possível afirmar que apenas o fator mudança na faixa granulométrica afeta

significativamente a média do volume de vazios.

Para a densidade aparente, não foi possível identificar uma tendência de comportamento nas misturas quanto ao uso de polímero, pois nas misturas com a Faixa B houve um aumento de 0,88% na média da mistura BsP em relação a BcP e nas misturas com a Faixa C houve o um aumento de 1,68% na média da mistura CsP para CcP, aumentando em média 1,28% na média da densidade aparente. Sendo este um resultado coerente com Amaral (2000), Mugayar (2004) e Zegarra (2007), pois estes relatam: Conforme Amaral (2000), quando adicionado polímero há um acréscimo de densidade aparente nas misturas com Faixa C, mas este relaciona este aumento com um fator externo; Conforme Zegarra (2007), quando adicionado polímero há um acréscimo de densidade aparente nas misturas com faixa C somente em misturas com teores acima de 5%; E conforme Mugayar (2004), quando adicionado polímero há um acréscimo de densidade aparente nas misturas de Faixa C somente em misturas com teores acima de 5% e não há uma mudança significativa nas misturas com Faixa B.

Quanto à mudança da faixa granulométrica, foi possível identificar que o uso da Faixa C em substituição a Faixa B provocou o aumento das médias entre as misturas que utilizam o mesmo ligante, em 9,45% da mistura BsP para CsP e em 10,32% da mistura BcP para CcP, aumentando em média 9,88% na média da densidade aparente. Sendo este resultado incoerente, conforme relatado por Mugayar (2004). Todas as médias foram consideradas significativamente diferentes entre si.

4.2 Correlações lineares entre os parâmetros volumétricos e mecânicos da dosagem Marshall

A correlação foi realizada entre os parâmetros da dosagem Marshall para cada mistura executada na obra, de forma a sempre analisar como uma variável volumétrica (Teor de asfalto, densidade aparente, porcentagem de vazios, V.C.B., V.A.M. e R.B.V.) influência em uma variável mecânica (RTCD, estabilidade e fluência). Posteriormente, são apresentados e discutidos os resultados das intensidades das correlações. Na Tabela 4 são apresentadas células em verdes para números positivos indicando serem diretamente proporcionais e células em vermelho para números negativos indicando serem inversamente proporcionais.

Tabela 4: Correlação linear entre os parâmetros volumétricos e mecânicos da dosagem Marshall

MISTURAS	PARÂMETROS	QUANTIDADE DE CP	TEOR DE ASFALTO (%)	DENSIDADE APARENTE	% VAZIOS	% V.C.B.	% V.A.M.	% R.B.V.
BsP	RTCD (Mpa)	23	0,33	-0,74	0,69	0,07	0,66	-0,62
	ESTABILIDADE (Kgf)	23	-0,55	0,60	-0,48	-0,21	-0,59	0,42
	FLUENCIA	23	0,04	-0,16	0,16	-0,06	0,15	-0,16
BcP	RTCD (Mpa)	131	0,21	-0,13	0,06	0,20	0,18	-0,01
	ESTABILIDADE (Kgf)	129	0,20	0,05	-0,06	0,07	-0,05	0,10
	FLUENCIA	129	-0,13	-0,07	0,07	-0,08	0,07	-0,08
CsP	RTCD (Mpa)	71	-0,07	-0,38	0,38	-0,28	0,32	-0,39
	ESTABILIDADE (Kgf)	66	-0,51	0,15	-0,08	-0,39	-0,26	0,12
	FLUÊNCIA	66	-0,11	0,10	-0,11	-0,03	-0,13	0,10
CcP	RTCD (Mpa)	183	-0,11	-0,16	0,14	-0,15	0,13	-0,16
	ESTABILIDADE (Kgf)	176	-0,25	-0,23	0,24	-0,32	0,16	-0,27
	FLUÊNCIA	175	-0,09	-0,03	0,03	-0,09	0,01	-0,05

Na Tabela 4 não é possível identificar correlações entre todas as misturas, dentre os resultados obtidos, apenas a mistura BsP apresentou correlações válidas entre os parâmetros volumétricos e os mecânicos, destacadas em verde e vermelho. No total há sete dados de correlações válidas, sendo quatro inversamente proporcionais (Densidade aparente x RTCD, RBV x RTCD, teor de asfalto x estabilidade, VAM x estabilidade) e três diretamente proporcionais (Volume de vazios x RTCD, VAM x RTCD, densidade aparente x estabilidade).

5. CONCLUSÃO

Em suma, pode-se concluir que:

- O uso de polímero SBS aumentou, em média, a fluência (+0,86%), o RBV (+1,29%) e a densidade aparente (+1,28%) e diminuiu, em média, a RTCD (-8,24%), VAM (-1,78%) e o Vv (-5,24%), independentemente da faixa granulométrica. Não se detectou tendência de comportamento quanto a estabilidade;
- O uso de polímero SBS provocou alterações significativas nas médias de RTCD (redução) e densidade aparente (aumento), porém não alterou de forma estatisticamente significativa os parâmetros estabilidade, VAM, RBV e Vv;
- Uma possível explicação para as misturas com polímero terem apresentado menor RT é a maior dificuldade na execução/trabalhabilidade da mistura o que pode resultar em menor compactação da mistura asfáltica.
- A mudança da granulometria do concreto asfáltico da Faixa B para a Faixa C aumentou, em média, a estabilidade (+4,84%), o VAM (+10,43%), a RBV (+9,88%) e a densidade aparente (+9,88%) e reduziu, em média, a fluência (-2,77%) e o volume de vazios (-13,05%), independentemente do uso de SBS. Não se detectou tendência

de comportamento quanto a RTCD;

- A mudança da granulometria do concreto asfáltico provocou alterações significativas nas médias de VAM, RBV, densidade aparente (aumento) e volume de vazios (redução), no entanto não se pode afirmar que as médias dos valores de estabilidade sejam significativamente diferentes à luz do teste t.
- De modo geral, não foram detectadas correlações válidas entre os parâmetros volumétricos e mecânicos para todas as quatro misturas utilizadas (BsP, BcP, CsP e CcP);
- Apenas a mistura BsP apresentou correlações válidas entre propriedades mecânica *versus* parâmetros volumétricos, a saber: RTCD x VV, RTCD x VAM e Estabilidade x densidade aparente, correlações diretamente proporcionais, e; RTCD x densidade aparente, RTCD x RBV, Estabilidade x teor de asfalto e Estabilidade x VAM, correlações inversamente proporcionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amaral, S. da C. (2000) *Estudos de misturas asfálticas densas com agregados do estado do Pará, utilizando asfalto convencional (CAP-40) e asfalto modificado com polímero SBS (BETUFLEX B 65/60)*. USP – EESC. São Carlos.
- Balbo, J. T. (2007). *Pavimentação asfáltica: Materiais, projeto e restauração*. Oficina de Textos. São Paulo.
- Bernucci, L. B. [et al.] (2006). *Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros*. PETROBRAS, ABEDA. Rio de Janeiro.
- DNER-ES (1999). *DNER-ES 385: Pavimentação – concreto asfáltico com asfalto polímero*. Departamento Nacional De Estradas De Rodagem.
- DNIT (2006). *DNIT 031 – ES: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço*. Departamento Nacional De Infraestrutura De Transporte.
- Fonseca, A. M. (2016). Avaliação da influência do controle tecnológico na qualidade de Obras de pavimentação. Estudo de caso: Viário do parque olímpico. UFRJ – Escola Politécnica. Rio de Janeiro.
- Freitas, F.J.S. (1996) *Asfalto modificado com EVA*. Anais de 30º Reunião Anual de Pavimentação, v.1, p.61-74.
- Marques, B. C., Amador II, N. C. (2017) *Viabilidade técnica do asfalto modificado com polímero (SBS)*.. Adualem Educacional Do Brasil – FACI. Belém.
- Mugayar N. A. (2004) *Avaliação dos efeitos do tipo de asfalto e da distribuição granulométrica do agregado nas fluências estática e dinâmica de misturas asfálticas densas*.. EESC-USP, São Carlos, SP, Brasil.
- Yildirim, Y. Polymer Modified Asphalt Binders. *Construction and Building Materials*, vol. 21, p. 66-72, 2007.
- Zegarra, J. R. E. (2007). *Avaliação de misturas produzidas com ligantes asfálticos peruanos convencional PEN 60/70 e modificados por polímeros SBS tipo I 60/60 e PG 76-22*. USP – EESC. São Carlos.

Iury Euclides Maciel (iuryemaciel@hotmail.com)

Marcelo Figueiredo Massulo Aguiar (mmassulo@ufpa.br) - Prof. Adjunto II ITEC
Faculdade de Engenharia Civil, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará
Rua Augusto Corrêa 01, Cidade universitária, Guamá – Belém, PA, Brasil