

Avaliação do desempenho de misturas asfálticas com rejeitos de ardósia

Performance evaluation of asphalt mixtures with slate tailings

DOI:10.34117/bjdv7n3-829

Recebimento dos originais: 08/02/2021

Aceitação para publicação: 01/03/2021

Matheus Evangelista Gonçalves Bispo

Graduando em Engenharia Civil

Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)

Endereço: Rua Professor Paulo Magalhães Gomes, nº122 – Bairro Bauxita, CEP: 35440-000, Ouro Preto – MG, Brasil

E-mail: matheusebispo@hotmail.com

Hebert da Consolação Alves

Mestre em Engenharia Civil

Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)

Endereço: Rua Professor Paulo Magalhães Gomes, nº122 – Bairro Bauxita, CEP: 35440-000, Ouro Preto – MG, Brasil

E-mail: hebertalvesa@yahoo.com.br

Daniela Antunes Lessa

Doutorado em Engenharia Civil

Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)

Endereço: Rua Professor Paulo Magalhães Gomes, nº122 – Bairro Bauxita, CEP: 35440-000, Ouro Preto – MG, Brasil

E-mail: daniela.lessa@ufop.edu.br

Rodolfo Gonçalves Oliveira da Silva

Doutorado em Engenharia Civil

Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG) – Campus Congonhas

Endereço: Av. Michel Pereira de Souza, nº3007 – Bairro Campinho, CEP: 36417-050, Congonhas – MG, Brasil

E-mail: rodolfo.goncalves@ifmg.edu.br

Ronderson Queiroz Hilário

Doutorado em Engenharia Civil

Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

Endereço: Av. Antônio Carlos, nº6627 – Bairro Pampulha, CEP: 31270-901, Belo Horizonte – MG, Brasil

E-mail: ronderson@etg.ufmg.br

Edgar Alfredo Sá

Graduado em Engenharia Civil

Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)

Endereço: Rua Professor Paulo Magalhães Gomes, nº122 – Bairro Bauxita, CEP: 35440-000, Ouro Preto – MG, Brasil

E-mail: gagafixe87@gmail.com

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo analisar o desempenho mecânico de concretos asfálticos usinados a quente (CAUQ) utilizando o rejeito de ardósia como agregado alternativo e verificar a eficiência do mesmo em revestimentos asfálticos em comparação aos agregados normalmente utilizados. A confecção dos corpos de prova foi feita de acordo com a metodologia Marshall de dosagem das misturas asfálticas, utilizando como ligante o cimento asfáltico de petróleo tipo CAP 50/70. Foram realizados ensaios para caracterização dos agregados e das misturas, conforme a norma DNIT ES 031/2006. A caracterização mecânica das misturas foi realizada por meio dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral (RT), módulo de resiliência (MR), determinação da estabilidade e fluência Marshall. Os resultados dos ensaios mecânicos da mistura de rejeitos de ardósia (MRA) foram comparados com uma Mistura Asfáltica Convencional. Os parâmetros RT, estabilidade e fluência Marshall da MRA foram satisfatórios. A única consideração feita está relacionada aos resultados elevados encontrados no ensaio MR, surgindo-se questionamentos quanto à veracidade dos valores obtidos e sugerindo-se uma análise química e petrográfica nos agregados de ardósia com o intuito de se obter explicações mais precisas quanto ao módulo de resiliência dessas misturas asfálticas. Por fim, realizou-se uma análise econômica do custo-material de cada uma das misturas.

Palavras-chave: Ardósia, mistura asfáltica, rejeito, concreto asfáltico

ABSTRACT

The present work aimed to analyze the mechanical performance of hot-rolled asphalt concrete (CAUQ) using slate tailings as an alternative aggregate and to verify the efficiency in asphalt coatings in comparison to the aggregates normally used. The specimens were made in accordance with the Marshall methodology for dosing asphalt mixtures, using CAP 50/70 asphalt oil cement as a binder. Tests were carried out to characterize the aggregates and the asphalt mixtures, according to the DNIT ES 031/2006 standard. The mechanical characterization of the asphalt mixtures was carried out through the tests of tensile strength by diametrical compression (RT), resilience modulus (MR), determination of Marshall stability and fluence test. The results of the mechanical tests of the slate tailings mixture (MRA) were compared with a Conventional Asphalt. The parameters RT, Marshall stability and fluency were satisfactory in the MRA. The only consideration to be made is related to the high results found in the MR test, raising questions about the veracity of the values obtained and suggesting a chemical and petrographic analysis in the slate aggregates in order to obtain more precise explanations regarding the resilience modulus of these asphalt mixtures. Finally, an economic analysis of the material cost of each mixture was carried out.

Keywords: Slate, asphalt mixtures, tailing, asphalt concrete

1 INTRODUÇÃO

O transporte rodoviário no Brasil é o principal modo utilizado para a circulação de bens, serviços e pessoas. Em 2019, a Confederação Nacional de Transportes (CNT) realizou um levantamento sobre a malha rodoviária brasileira. Nessa pesquisa, constatou-se que 12,4% das rodovias são pavimentadas e observou-se uma piora nas condições das

mesmas em aspectos relacionados ao conforto, segurança, sinalização, geometria da via e qualidade do pavimento (CNT, 2019).

A extensão da malha rodoviária brasileira é insuficiente com relação à demanda da atividade transportadora, pois não oferece vias com boas condições de tráfego (qualidade do pavimento, conforto e segurança) ao longo de todo o território nacional. O setor produtivo tem demonstrado uma crescente insatisfação devido aos poucos investimentos realizados em melhorias das rodovias brasileiras (SILVA, 2017). Mesmo que os bens produzidos no país possam ser competitivos na fase de produção, eles perdem competitividade no quesito infraestrutura de transportes, devido à matriz deficiente e incapaz de atender às necessidades do transporte de cargas nacional (BERNUCCI, MOTTA, *et al.*, 2008).

Um aspecto a destacar são os gastos elevados com manutenção das vias, que pode ser considerado um entrave enfrentado não só para manter a qualidade das estradas, mas também para atender a demanda desse modo de transporte. Há uma dificuldade em se realizar políticas públicas eficazes a fim de garantir uma boa qualidade das rodovias. Nota-se um problema quanto à gestão e à destinação dos recursos às melhorias do sistema de transporte rodoviário brasileiro (CNT, 2019).

Esse contexto, juntamente com a tendência de se aplicar soluções mais sustentáveis ao meio ambiente, reforçam a importância do desenvolvimento de pesquisas e de novas técnicas para o aproveitamento de materiais alternativos na construção de infraestruturas rodoviárias.

O estudo dos rejeitos de ardósia, seguindo-se todas as especificações técnicas, surge como uma alternativa para se produzir um pavimento que suporte todos os carregamentos e desgastes provindos do tráfego de veículos e que possua um bom tempo de vida útil, para que seu estado de serventia atenda aos usuários nos quesitos conforto e segurança (SILVA, 2017).

Na cidade de Papagaios, Minas Gerais, predomina-se a atividade de extração da ardósia, uma rocha metamórfica de baixo grau e de origem sedimentar, formada a partir de rochas argilosas pré-existentes (OLIVEIRA, 2017); (RODRÍGUEZ e BAYÓN, 1997). Toda a matéria-prima extraída é destinada a produção de revestimento para pisos e paredes, placas, preparação de terrenos, pré-moldados, telhas, tampos para mesas de bilhar, móveis, artefatos para decoração e artesanato e, como consequência, gera uma quantidade considerável de resíduos, que em geral, são depositadas a céu aberto nas pedreiras (SILVA, 2015). Os rejeitos são encontrados nas formas de matacões, cacos, aparas, lama e pó de

pedra, sendo que o descarte não é realizado conforme a legislação ambiental do Estado e, ainda, somente 10% de toda a rocha extraída da lavra consegue ser aproveitada após os processos de beneficiamento (OLIVEIRA, 2017). Nesse sentido, no que tange à questão ambiental e econômica, surge a preocupação com o volume e a destinação dos rejeitos que são gerados.

O uso de um material alternativo, além do seu baixo custo, visa otimizar a vida útil das rodovias e diminuir os gastos para o Estado, já que com a substituição dos agregados convencionais será estimulada a construção de vias com pavimento de menor custo, com a possibilidade de oferecer ao usuário melhores condições para trafegar com conforto e segurança (SILVA, 2017). Além de propor uma reutilização para o rejeito de ardósia, pode-se agregar valor econômico ao material e inseri-lo num ciclo produtivo como agregado.

Portanto, considerando-se os aspectos mencionados, foi desenvolvido o presente estudo com a proposta de utilização de rejeitos de ardósia em misturas asfálticas usinadas a quente para compor o revestimento de rodovias.

1.1 OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho é realizar uma análise de viabilidade técnica e econômica de concretos asfálticos usinados a quente (CAUQ) com rejeitos de ardósia como agregados alternativos, utilizando como parâmetro de comparação uma Mistura Asfáltica Convencional.

2 REJEITO DE ARDÓSIA NA PAVIMENTAÇÃO

O rejeito de ardósia possui o interesse de pesquisadores em explorar o aproveitamento do material na área de pavimentação. Silva (2014) realizou um estudo com rejeitos de ardósia para aplicação em misturas asfálticas do tipo pré-misturada a frio (PMF). Houve a implantação desse pavimento em trechos experimentais do município de Fortuna de Minas, Minas Gerais. O desempenho das misturas PMF foram consideradas satisfatórias para vias de baixo tráfego, sendo, portanto, recomendável em pavimentações de baixo custo em cidades próximas aos locais de geração e deposição dos resíduos (SILVA, 2014).

Uma aplicação de misturas asfálticas com agregados de ardósia usinados a quente foi realizada pela Micapel Slate, em parceria com a Engesa Engenharia. Em 2004, numa obra recuperação da BR-040 entre os municípios de Pompéu e Curvelo, realizaram a pavimentação de um trecho experimental de 10 km. Entre os anos de 2006 e 2007, as mesmas construtoras também adotaram o mesmo procedimento para asfaltar um trecho de

230 km entre as cidades de Felixlândia e João Pinheiro (MICAPEL, 2016). A Figura 1 ilustra a execução do pavimento com rejeitos de ardósia, num trecho da BR-040.

Figura 1 - Execução de trecho com pavimento de ardósia



Fonte: Micapel, 2016

Silva (2015) afirma que o emprego de rejeitos de ardósia como agregado graúdo em pavimentação asfáltica é dificultado por causa da característica lamelar das ardósias, já que a brita possui características de ter superfícies lisas, dificultando a aderência do aglomerante. No entanto, a sua utilização para composição do asfalto pré-misturado a frio ou a quente é viável, preferencialmente em vias de baixo volume de tráfego (SILVA, 2015).

Segundo a Micapel (2016), os empreendimentos demonstraram utilização favorável tanto da brita quanto do pó de ardósia em misturas asfálticas à quente. A estrutura lamelar não tornou inadequado o uso em pavimento de rodovia e representou uma economia de aproximadamente 30% para a empresa (MICAPEL, 2016). Por fim, apontam para a viabilidade de se utilizar os rejeitos de ardósia em obras de pavimentação local, englobando a área dos municípios em torno dos locais de extração.

3 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

Os agregados dessa pesquisa foram rejeitos de ardósia provenientes da cidade de Papagaios, localizada na região central do estado de Minas Gerais.

Os materiais adquiridos foram submetidos a ensaios de caracterização com a finalidade de verificar a utilização dos mesmos como agregados em misturas asfálticas, segundo as normas de especificação do DNIT. Assim, as amostras de ardósia passaram

pelos seguintes ensaios: granulometria, abrasão Los Angeles, adesividade, massa específica dos agregados graúdos e miúdos, equivalente de areia, absorção dos agregados graúdos, índice de forma e perda ao choque no aparelho Treton. Os resultados dos ensaios citados estão representados na Tabela 1. A Tabela 2 apresenta os resultados de caracterização do gnaisse, agregado utilizado na composição da mistura asfáltica convencional. Os limites apresentados nas Tabelas 1 e 2 são estabelecidos pelo DNIT ES 031.

Tabela 1- Caracterização dos Agregados de Ardósia

Ensaio	Resultado	Limites	
Densidade real - agregado miúdo (g/cm ³)	2,74	-	
Densidade real - agregado graúdo (g/cm ³)	2,75	-	
Densidade aparente - agregado graúdo (g/cm ³)	2,71	-	
Absorção - agregado graúdo (%)	0,51	< 2	
Equivalente de areia (%)	25,21	> 55	
Índice de forma - Graduação D	0,59	> 0,5	
Treton (%)	12	< 60	
Adesividade	Satisfatória	-	
Abrasão	Graduação B	19,1	< 50
Los Angeles (%)	Graduação C	17,1	< 50
	Graduação C	17,4	< 50

Fonte: Autoria própria, 2021

Tabela 2- Caracterização dos Agregados de Gnaisse

Ensaio	Resultado	Limites	
Densidade real - agregado miúdo (g/cm ³)	2,69	-	
Densidade real - agregado graúdo (g/cm ³)	2,66	-	
Densidade aparente - agregado graúdo (g/cm ³)	2,64	-	
Absorção - agregado graúdo (%)	0,30	< 2	
Equivalente de areia (%)	76	> 55	
Índice de forma	Graduação C	0,98	> 0,5
	Graduação D	0,69	> 0,5
Treton (%)	23	< 60	
Adesividade	Satisfatória	-	
Abrasão	Graduação B	29	< 50
Los Angeles (%)	Graduação C	30	< 50
	Graduação D	32	< 50

Fonte: Silva, 2017

Observa-se que os agregados de ardósia apresentaram resultados satisfatórios e dentro dos limites estabelecidos, exceto no parâmetro de equivalente de areia, que ficou com um valor abaixo do recomendado. Uma explicação para esse valor reduzido se deve à presença do material argiloso que faz parte da constituição da brita de ardósia. A presença do material argiloso pode dificultar a adesividade do ligante asfáltico com os agregados de ardósia, havendo a necessidade de realizar um tratamento de adesão do ligante com os agregados. Deve-se fazer um processo de lavagem do material para se retirar as partículas

finas presentes. Para o índice de forma, o resultado de 0,59, próximo ao limite mínimo de 0,5, confirma o formato característico lamelar dos agregados. Partículas nesse formato diminuem a trabalhabilidade da mistura, dificultando a compactação, além de aumentar o consumo do ligante asfáltico (Silva, 2017). Destaca-se que Silva (2014) encontrou um resultado de índice de forma abaixo do recomendado para sua amostra de ardósia. Nessa presente pesquisa, o valor obtido está conforme as recomendações.

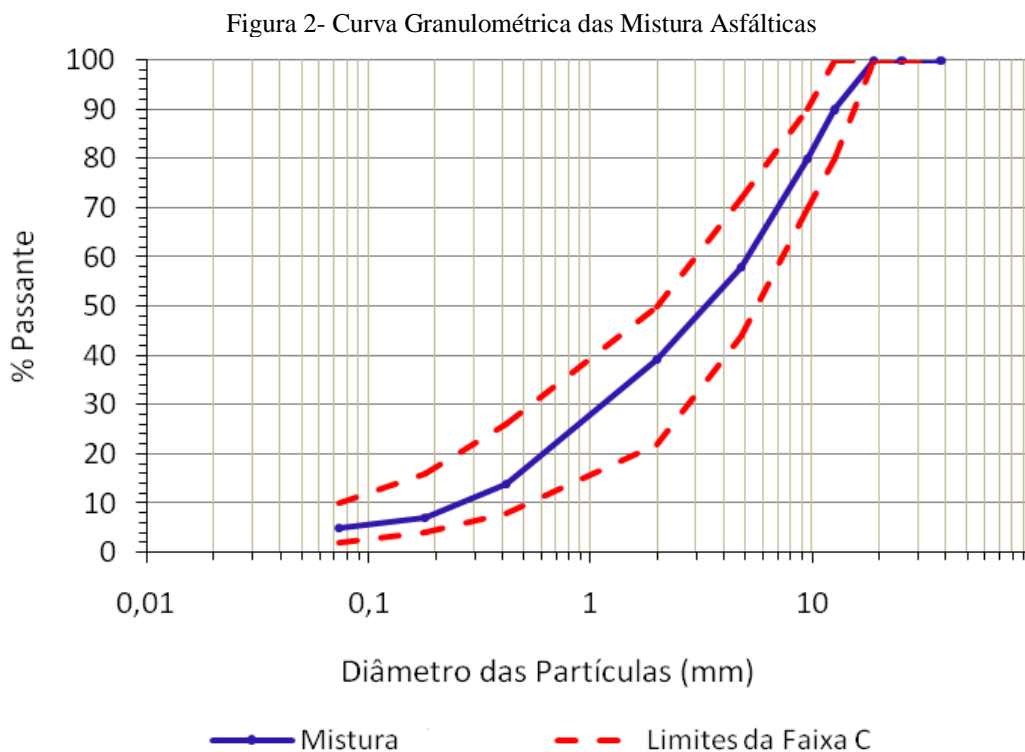
Para os agregados de gnaiss observa-se que possuem valores de densidade real e de densidade aparente inferiores à ardósia. No ensaio de equivalente de areia, apesar de apresentar um resultado acima do mínimo exigido, indica a presença de pó na superfície da agregado e/ou a presença de material fino gerada no processo de britagem do gnaiss (Silva, 2017). Recomenda-se, também, realizar a lavagem do material para retirada dos finos.

4 METODOLOGIA MARSHALL

Para a dosagem das misturas asfálticas foi adotada a norma DNER-ME 043 (1995), que especifica os procedimentos da metodologia Marshall. O objetivo é determinar a proporção de ligante e agregado que confere ao revestimento asfáltico desempenho satisfatório de utilização (BERNUCCI, MOTTA, *et al.*, 2008).

O Concreto Asfáltico de Petróleo (CAP) utilizado foi do tipo CAP 50/70. Este é proveniente da refinaria de Gabriel Passos (REGAP), pertencente à Petrobras, localizada na cidade de Betim, Minas Gerais.

Para a composição granulométrica das misturas asfálticas adotou-se a faixa C de rolamento do DNIT (DNIT-ES-031, 2006). Portanto, foram estabelecidos os percentuais em massa dos agregados, pelo método da tentativa e erro, de maneira tal que a curva da mistura de projeto se situasse entre os limites definidos dessa faixa, conforme apresentado na Figura 2. As misturas asfálticas eram constituídas de 40% da massa de brita zero de ardósia, 30% de pó de pedra e os restantes 30%, por areia. Destaca-se que essa proporção de areia era constituída de ardósia e foi produzida em laboratório e incrementada na mistura com a finalidade de se conseguir uma porcentagem maior de finos e, como consequência, para que pudesse enquadrá-la melhor dentro dos limites estabelecidos pela faixa C do DNIT.



Fonte: Autoria própria, 2021

O teor de ligante de projeto para as misturas asfálticas com rejeito de ardósia foi definido segundo uma metodologia proposta por Soares *et al.* (2000) apud (SILVA, 2017), em função dos parâmetros RBV (Relação betume-vazios) e Vv (Volume de vazios). Foi estimado um teor de ligante de asfalto de 5,5%. Em seguida, definiu-se valores de teor acima e abaixo do valor pré-estabelecido inicialmente, devendo-se moldar três corpos de prova para cada um deles. Portanto, além do teor de ligante de 5,5%, foram moldados grupos de CPs contendo 4,5%, 5,0%, 6,0% e 6,5% de CAP.

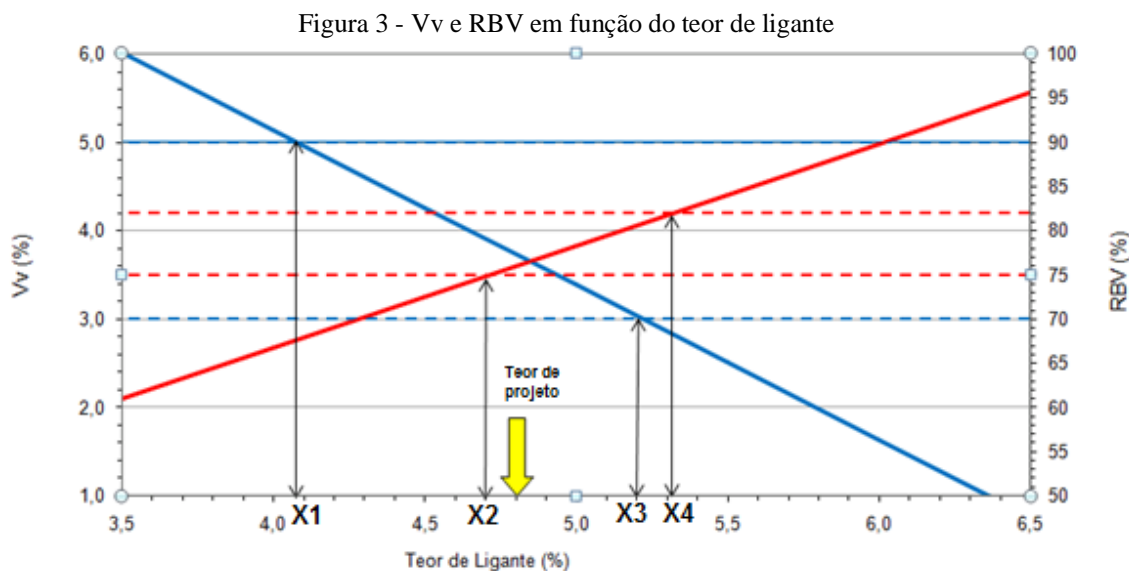
Por fim, obtém-se os valores médios de Vv e RBV para cada um desses teores e monta-se um gráfico desses dois parâmetros em função do teor de ligante. Nesse gráfico, deve-se destacar os limites de cada uma das variáveis, apresentados na Tabela 3Tabela , com os respectivos teores de ligante, representados por X1, X2, X3 e X4.

A Figura 3 ilustra as curvas Vv e RBV das misturas com rejeito de ardósia em função do teor de CAP. A linha azul é referente ao Vv, enquanto a de cor vermelha, representa a RBV. O teor ótimo foi definido como um valor compreendido entre os teores centrais X2 e X3, pois é entre esses dois valores que a mistura asfáltica obedece ao mesmo tempo as condições de Vv e RBV impostas na Tabela 3.

Tabela 3 - Limites de Vv e RBV

Parâmetros	Método de Ensaio	Limites para camada de rolamento
Vv(%)	DNER-ME 043 (1995)	3 – 5
RBV (%)	DNER-ME 043 (1995)	75 – 82

Fonte: DNIT-ES 031, 2006



Portanto, o teor de projeto para as misturas asfálticas constituídas com rejeito de ardósia foi estabelecido em 4,8%.

5 ENSAIOS MECÂNICOS

Foram realizados ensaios de resistência à tração por compressão diametral (RT), módulo de resiliência (MR), determinação da estabilidade e fluência Marshall, com a Mistura com Rejeito de Ardósia (MRA) no teor de projeto de 4,8%, com os resultados sendo comparados com a mistura asfáltica convencional, denominada Mistura Comparativa de Gnaisse (MCG), no teor de projeto de 5,0%. Todos os valores referentes à MCG foram obtidos por Silva (2017).

5.1 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (RT)

A resistência à tração das misturas asfálticas foi avaliada conforme a norma DNIT-ME 136 (2010). Nesse ensaio, aplica-se uma carga de compressão diametralmente ao corpo de prova, o que causa um estado biaxial de tensões, com o surgimento de forças de tração

no centro do CP (DNIT-ME136, 2010), conforme ilustrado na Figura 4. O valor mínimo de RT para uma camada de rolamento é de 0,65 MPa (DNIT-ES-031, 2006).

Figura 4- Ensaio RT



Fonte: Autoria própria

A Tabela 4 apresenta o resultados de RT médio para MRA e MCG, dosadas no teor de projeto. Para a obtenção do valor médio da ardósia foram utilizados três CPs durante o ensaio.

Tabela 4 - Resultados do Ensaio RT

Mistura	TP (%)	RT (MPa)
MRA	4,8	1,58
MCG	5,0	1,46

Fonte: Autoria própria

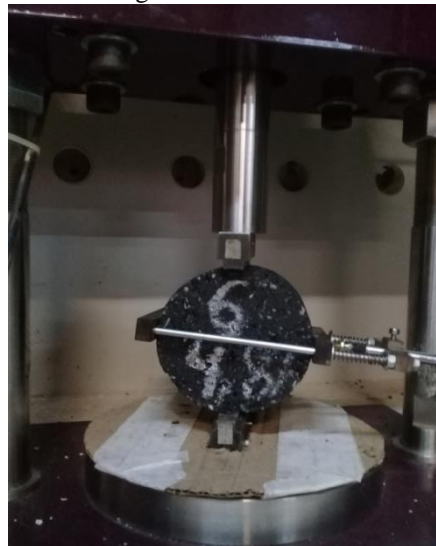
De acordo com os resultados apresentados na Tabela 4,

Tabela-se que tanto a MRA quanto a MCG possuem os valores médios de RT superiores a 0,65 MPa, atendendo as especificações mínimas de desempenho estabelecidas pelo DNIT-ES 031 (2006) para revestimentos. Pode-se afirmar que a utilização da brita de ardósia em misturas asfálticas acarretou num aumento da resistência à tração das mesmas, quando comparadas à MCG. Em termos percentuais, houve um acréscimo de 8,2% na resistência à tração para a mistura de ardósia em comparação à de gnaisse.

5.2 ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MR)

Para a execução do procedimento, mede-se a deformação elástica da amostra com o auxílio de um transdutor eletrônico do tipo LVDT (Linear Variable Displacement Transducer), posicionado na lateral do corpo de prova de forma a registrar as deformações no plano perpendicular à aplicação da carga (DNIT-ME135, 2010), conforme a Figura 5. O ensaio foi realizado com os corpos de prova com rejeito de ardósia a 25° C, no teor de projeto de 4,8%. A Tabela 5 mostra a média da resiliência de três CPs, e a relação encontrada entre MR e RT de cada uma das misturas. Os valores para a MCG foram obtidos por Silva (2017).

Figura 5- Ensaio MR



Fonte: Autoria própria

Tabela 5 - Resultados do Ensaio MR

Mistura	TP (%)	MR (MPa)	MR/RT
MRA	4,8	16.591	10.500
MCG	5,0	6.431	4.405

Fonte: Autoria própria

De acordo com os resultados apresentados, percebe-se que a MRA possui um módulo de resiliência bastante superior à MCG a 25° C, o que afere a essa mistura uma elevada rigidez em comparação à de gnaíse.

Alguns questionamentos podem ser feitos com relação ao resultado obtido para o módulo de resiliência da mistura asfáltica com rejeito de ardósia. Não foi encontrado nenhum outro trabalho na literatura em que uma mistura asfáltica obteve um MR tão elevado, seja essa composta de agregados convencionais ou alternativos. Também, não se tem outro trabalho com misturas asfálticas com ardósia usinadas à quente para se realizar

uma comparação. Apenas o Silva (2014), que obteve um MR de 1343 MPa. Este valor é considerado baixo se comparado com valores usuais de misturas de concreto asfáltico, mas aceitável por se tratar de uma mistura pré-misturada a frio (SILVA, 2014).

Marques (2004) obteve valores na faixa de 6000 a 8000 MPa nos seus ensaios para misturas asfálticas convencionais a 25° C. Silva (2017) também obteve resultados dentro dessa margem para misturas asfálticas com rejeito de minério de ferro, constatando um aumento do MR em algumas misturas quando comparadas às convencionais. Joenck et. al. (2020) analisou misturas asfálticas com adições de fibras de aço, escória e pó de grafite e também constatou uma elevação no MR dessas misturas em comparação às convencionais. Percebe-se, portanto, um aumento no valor de módulo de resiliência em misturas asfálticas com agregados alternativos. Porém, o valor de MR de 16591 MPa para a mistura com rejeito de ardósia permite gerar questionamentos acerca de sua veracidade:

- Primeiro: trata-se de uma característica do material e a consideração anterior acerca de sua elevada rigidez é verdadeira. Uma análise química e petrográfica dos agregados de ardósia poderia confirmar essa hipótese.
- Segundo: O equipamento do laboratório estava descalibrado e gerou um erro de leitura no resultado do ensaio. Destaca-se que o Laboratório de Ferrovias e Asfalto da Universidade Federal de Ouro Preto é um dos poucos lugares que dispõem desse equipamento no estado de Minas Gerais. Uma sugestão é solicitar uma revisão na calibragem desse equipamento e repetir o ensaio de MR para comparar os resultados.
- Terceiro: As condições de armazenamento do ligante asfáltico não eram as ideais, o que compromete no seu envelhecimento com a evaporação de substâncias voláteis que o compõem. O envelhecimento do ligante contribui para um aumento do valor do MR em misturas asfálticas (SILVA, 2017).
- Quarto: Erro humano durante o procedimento de execução do ensaio MR.

Marques (2004) elaborou um modelo para previsão do módulo de resiliência de concretos asfálticos utilizando agregados convencionais. Os limites máximos e mínimos de MR para o teor de ligante de 5,0% estão expressos na Tabela 6:

Tabela 6 - Modelo simplificado para previsão do MR para concretos asfálticos convencionais especificados na faixa C do DNIT

Teor (%)	MR previsto (MPa)	Valores de MR	
		Mínimo	Máximo
5,0	5.942	5.217	6.668

Fonte: Marques, 2004 (adaptado)

De acordo com a Tabela 6, nota-se que a MCG encontra-se dentro do intervalo estabelecido por Marques (2004) para o seu teor de ligante de 5,0%. Por outro lado, o modelo de Marques (2004) não é válido para a MRA, já que essa mistura é constituída por um rejeito. Para um teor de projeto de 4,8% em uma mistura asfáltica composta de agregados não convencionais (no caso, ardósia) é de se esperar que não se comporte segundo a análise prevista pelo autor, por se tratar de um rejeito.

A relação entre módulo de resiliência e resistência à tração (MR/RT), expressa na Tabela 4Tabela, é um parâmetro utilizado como indicador da vida de fadiga, uma vez que agrega informações de rigidez e resistência das misturas (SILVA, 2017). É recomendado um valor na ordem de 3000 para que a mistura apresente um desempenho satisfatório à fadiga, mantendo-se bons os padrões de flexibilidade e resistência à tração (BERNUCCI, MOTTA, *et al.*, 2008). Tanto a MRA, quanto a MCG apresentaram valores de MR/RT superiores ao sugerido por Bernucci, Motta, *et al.* (2008). Para a MRA, a relação obtida de 10500 pode estar relacionada à sua elevada rigidez (módulo de resiliência elevado). Mas novamente pode-se fazer os mesmos questionamentos levantados anteriormente.

Se for característica da mistura asfáltica possuir essa elevada rigidez, associado a esse fator, também teria a característica de ter baixa flexibilidade e, por isso, essa rigidez contribuiria para o rompimento do concreto asfáltico por fadiga. O mais prudente a se fazer é levantar esses questionamentos, solicitar a revisão dos equipamentos de laboratório, verificar as condições de armazenamento do ligante, repetir o ensaio MR e realizar análise química e petrográfica dos agregados de ardósia, a fim de se obter explicações mais precisas quanto ao módulo de resiliência dessas misturas asfálticas.

5.3 ENSAIO DE ESTABILIDADE E FLUÊNCIA MARSHALL

A Estabilidade Marshall é definida como a resistência máxima a compressão radial apresentada pelo corpo de prova, expressa em Newton (N), enquanto a Fluência representa a deformação total do CP, desde a aplicação da carga inicial nula até a aplicação da carga máxima, expressa em décimos de milímetros (DNER-ME-043, 1995). Os dois parâmetros são obtidos simultaneamente, conforme a Figura 6:

Figura 6-. Ensaio de Estabilidade e Fluência Marshall



Fonte: Autoria própria

A Tabela 7 apresenta os resultados médios da Estabilidade e Fluência Marshall, realizados com três corpos de prova no teor de ligante ideal de cada mistura asfáltica. As duas misturas apresentaram valores acima de 5000 N, limite mínimo recomendado pelo DNIT-ES 031 (2006) para a Estabilidade de revestimentos asfálticos. A MCG possui uma estabilidade superior à MRA.

Tabela 7 - Resultados da Estabilidade e Fluência Marshall

Mistura	TP (%)	Estabilidade (N)	Fluência (mm)
MRA	4,8	13.533	6,2
MCG	5,0	15.276	4,1

Fonte: Autoria própria

6 ANÁLISE ECONÔMICA

A análise econômica das misturas asfálticas foi baseada na composição de preço unitário dos concretos asfálticos. Foram considerados os custos por tonelada dos agregados e ligante. As tabelas 8 e 9 apresentam, respectivamente, o custo do material por tonelada da mistura asfáltica convencional e da composta por rejeito de ardósia, bem como o percentual de cada agregado (brita zero, brita um e areia) definidos no teor de projeto. Para o gnaise, os custos de cada tipo de brita foram fornecidos por uma pedreira localizada na cidade de Ouro Preto, Minas Gerais. Já o preço dos agregados de ardósia são de uma pedreira pertencente ao município de Papagaios, Minas Gerais. O valor da areia corresponde a uma média do preço dos fornecedores da região desse município. O custo do CAP 50/70 foi baseado na média do ligante asfáltico no estado de Minas Gerais referente

ao mês de julho de 2020, fornecido pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Combustível (ANP, 2020).

Tabela 8 - Custo unitário por tonelada do CAUQ convencional

Materiais	Composição MCG (%)	Unidade	Custo (R\$)	Consumo	Custo Unitário
Brita 0	49,4	t	61,00	0,494	30,13
Pó de pedra	45,6	t	45,00	0,456	20,52
CAP 50/70	5,0	t	2.154,85	0,050	107,74
Custo do CAUQ por tonelada (R\$/t)					158,39

Fonte: Autoria própria

Tabela 9 - Custo unitário por tonelada do CAUQ com de rejeito de ardósia

Materiais	Composição Ardósia (%)	Unidade	Custo (R\$)	Consumo	Custo Unitário
Brita 0	38,08	t	25,00	0,3808	9,52
Pó de pedra	28,56	t	20,00	0,2856	5,71
Areia	28,56	t	38,00	0,2856	10,85
CAP 50/70	4,8	t	2154,85	0,048	103,43
Custo do CAUQ por tonelada (R\$/t)					129,51

Fonte: Autoria própria

Conforme exposto, nota-se que a mistura composta por rejeitos de ardósia apresentou um custo unitário inferior à mistura convencional. Em termos percentuais, significa uma redução de 18,2% do preço unitário quando empregado a mistura com rejeito de ardósia. Outro fator importante é a utilização de um teor de ligante asfáltico menor, elemento de maior custo, na mistura de ardósia.

7 CONCLUSÃO

As misturas asfálticas com rejeito de ardósia apresentaram uma resistência à tração superior em relação à MCG. Quanto ao resultado do módulo de resiliência, pode-se afirmar que o seu valor bastante elevado comprova a elevada rigidez dos agregados de ardósia.

Para as misturas asfálticas houve a utilização de um teor de ligante de projeto menor para o rejeito de ardósia em comparação à MCG. Observou-se não só a economia no consumo de CAP 50/70, mas também uma redução nos custos de aquisição dos materiais.

Na caracterização dos agregados de ardósia, o único parâmetro que ficou abaixo do recomendado foi o equivalente de areia, o que sugere uma grande quantidade de material fino na brita de ardósia. Recomenda-se realizar a lavagem dos agregados para a remoção dessas partículas finas.

Para o ensaio de módulo de resiliência, devem-se verificar os questionamentos impostos quanto ao resultado final obtido para a MRA. Recomenda-se realizar a repetição do ensaio ou novos ensaios, como análise química e petrográfica dos agregados, para se ter uma conclusão mais precisa acerca da rigidez e demais características do material e do parâmetro MR/RT.

Silva (2014) concluiu que o rejeito de ardósia é viável para uso em pavimentação em vias de baixo tráfego. Vale destacar que o autor utilizou misturas do tipo pré-misturada à frio. Percebe-se, portanto, que os rejeitos de ardósia têm potencial para serem utilizados em concretos asfálticos para compor o revestimento de rodovias.

Com base nas análises laboratoriais e nos condicionantes descritos, conclui-se que os rejeitos de ardósia podem ser empregados em misturas asfálticas usinadas à quente. Nessa análise, torna-se importante mencionar a redução do passivo ambiental causado pelo resíduo, redução do consumo dos agregados convencionais na pavimentação e redução de custos com a produção de um concreto asfáltico mais barato.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Preços de distribuição de produtos asfálticos**. 2020. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/precos-de-distribuicao>>. Acesso em: 01 setembro 2020.
- BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação Asfáltica- Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: Abeba, v. 3ª reimpressão, 2008.
- CNT. Confederação Nacional dos Transportes. **Pesquisa CNT de Rodovias 2019**, 2019. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br>>. Acesso em: 17 abril 2020.
- DNER-ME 043. **Misturas betuminosas a quente- Ensaio Marshall**. Rio de Janeiro. 1995.
- DNIT-ES 031. **Pavimentos flexíveis- Concreto asfáltico- Especificações de serviço**. Rio de Janeiro. 2006.
- DNIT-ME 135. **Pavimentação Asfáltica- Misturas Asfálticas- Determinação do módulo de resiliência**. Rio de Janeiro. 2010.
- DNIT-ME 136. **Determinação da resistência a tração por compressão diametral**. Rio de Janeiro. 2010.
- JOENCK, V. B. C. et. al. **Avaliação do desempenho mecânico de misturas asfálticas autorregenerativas com adição de fibras de aço, escória de alto forno e pó de grafite**. Revista Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 6, n. 11, p. 88967-88984, 2020.
- MARQUES, G. L. O. **Utilização do Módulo de Resiliência como Critério de Dosagem de Mistura Asfáltica: Efeito da Compactação por Impacto e Giratória**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.
- MICAPEL. **A utilização de brita de ardósia na pavimentação de vias de rodagem**, 2016. Disponível em: <<http://www.micapel.com.br>>. Acesso em: 14 maio 2020.
- OLIVEIRA, E. C. **Comportamento de misturas ternárias constituídas de cimento Portland, ardósia e escória de alto forno finamente moídas e sem uso de aditivos dispersantes**. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 180. 2017.
- RODRÍGUEZ, R. M.; BAYÓN, G. M. F. **Roca ornamental: Las pizarras ornamentales en España. Canteras y Explotaciones**. Madrid, p. 22-29. 1997.
- SILVA, M. R. L. **Estudo sobre a viabilidade técnica e econômica da utilização de resíduo industrial de ardósia em mistura asfáltica do tipo pré-misturado a frio**. p. 34-50. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p. 34-50, 2014. Disponível em: <<http://rmct.ime.eb.br/arquivos>>. Acesso em: 30 abril 2020.
- SILVA, R. **Propostas de Aproveitamento de Resíduos de Ardósia na Cidade de Pompéu, Minas Gerais**. Revista Intercâmbio, v. 6, p. 86-95, 2015.
- SILVA, R. G. O. **Caracterização de concreto asfáltico elaborado com rejeitos de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero**. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 205. 2017.
- SOARES, J.B.; FREITAS, F.A.C.; CASTELO BRANCO, J.V.; MOTTA, L.M.G. **Método de Previsão do Teor Ótimo de Ligante em Misturas Asfálticas tipo CBUQ**. In: 32ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Brasília, v. I, p. 148-160. 2000.