


**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA BRITAGEM DOS SEIXOS
ROLADOS PARA O USO COMO AGREGADO GRAÚDO EM
CONCRETO ASFÁLTICO**
**ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF PEBBLE CRUSHING FOR USE AS
COARSE AGGREGATE IN ASPHALT CONCRETE**

Marcus Vinícius Paula de Lima¹ 

Jesner Sereni Ildefonso² 

Andressa Zampieri Rosa³ 

José Leomar Fernandes Jr.⁴ 

Resumo: Alguns estados brasileiros apresentam escassez de jazidas de rocha britadas para pavimentação. Com isso, utiliza-se o seixo como agregado graúdo, muitas vezes sem britagem. Em sua forma natural, o seixo apresenta forma arredondada e textura lisa, o que resulta em menor resistência do pavimento aos esforços cisalhantes em comparação aos agregados britados. Nesse artigo, estudou-se o comportamento mecânico de misturas asfálticas dosadas na faixa C do DNIT, com seixo como agregado graúdo, analisando-se os casos com e sem britagem. O teor de asfalto de projeto foi definido com base na relação betume-vazios e no volume de vazios da mistura asfáltica de referência. O módulo de resiliência apresentou comportamento semelhante entre as misturas com e sem britagem do seixo. Já a resistência à tração se mostrou superior nas misturas com seixo britado, o que mostra melhora no comportamento da mistura e a importância de usar o seixo com faces fraturadas.

Palavras-chave: Pavimentação. Mistura asfáltica. Agregado. Resistência à tração. Módulo de resiliência.

Abstract: Some Brazilian states face a shortage of crushed rock quarries for pavement construction. As a result, pebbles are used as coarse aggregate, often without crushing. In its natural form, pebbles have a rounded shape and a smooth texture, which leads to lower pavement resistance to shear forces compared to crushed aggregates. This study analyzed the mechanical behavior of asphalt mixtures designed according to DNIT gradation C, using pebbles as coarse aggregate, considering both crushed and uncrushed conditions. The design asphalt content was determined based on the voids filled with asphalt and the air voids of the reference asphalt mixture. The resilient modulus showed similar behavior between mixtures with and without crushed pebbles. However, indirect tensile strength was higher in mixtures with crushed pebbles, indicating an improvement in mixture performance and highlighting the importance of using pebbles with fractured faces.

Keywords: Pavement. Asphalt mixture. Aggregate. Indirect tensile strength. Resilient modulus.

¹ Mestre, Universidade de São Paulo, mavipali01@gmail.com.

² Doutor, Universidade Estadual de Maringá, jsildefonso@uem.br.

³ Mestre, Universidade Estadual de Maringá, andressazrosa@hotmail.com.

⁴ Doutor, Universidade de São Paulo, leomar@sc.usp.br.

1 INTRODUÇÃO

Para a implantação de uma obra de engenharia, uma das etapas básicas é a avaliação dos materiais a serem utilizados. No caso da pavimentação, o estudo dos agregados é de fundamental importância, já que estes têm grande influência no custo total da mistura asfáltica e na qualidade e durabilidade do pavimento (PAZOS; SACRAMENTO; MOTTA, 2015).

A escolha dos agregados para utilização em revestimentos asfálticos depende de alguns fatores, como custo, qualidade, tipo de aplicação e disponibilidade. Na Região Norte do Brasil, mais especificamente nos estados do Acre, Amazonas e Pará, a escassez de jazidas de rochas passíveis de serem britadas para o uso em pavimentação limita a utilização de agregados convencionais nas misturas asfálticas, como os de origem basáltica ou granítica, já que a importação desses materiais pode representar custo demasiadamente elevado (CABRAL et al., 2008).

Como alternativa, o agregado utilizado nesses locais é o seixo rolado, de maneira a viabilizar técnica e economicamente a realização das obras por meio da utilização de um material existente na região (SILVA; FROTA, 2013).

Os seixos são rochas sedimentares detríticas originadas comumente do quartzo e de granulometria maior que a areia. Devido à ação das águas dos rios, sofrem processo físico de desgaste e arredondamento dos grãos, formando depósitos de grandes quantidades nas encostas e leitos dos rios. Sua retirada é feita pelo processo de dragagem, que consiste na sucção do material, levando-o até depósitos construídos no barranco do rio, de onde, posteriormente, serão levados para o armazenamento ou transportados para outros locais (CAMPELO; CAMPOS; ARAGÃO, 2019).

O seixo tem estrutura heterogênea e é classificado como agregado proveniente de erosão, transporte e decomposição de detritos de desagregação das rochas, devido à ação dos agentes de intemperismo geológico. Souza (2007) relata que na grande Belém/PA e nas rodovias BR-316 (trecho: Belém – Divisa do Pará com o Maranhão) e BR-010, também conhecida como a rodovia Belém-

Brasília, o agregado utilizado nas misturas asfálticas foi o seixo, advindo de jazidas da região.

Campelo *et al.* (2019) destacam a utilização do seixo, sem passar por processos de britagem, como agregado graúdo em misturas asfálticas na cidade de Manaus. No estado natural, o material apresenta textura lisa, o que diminui a quantidade de ligante necessária para preencher os vazios quando comparado às misturas asfálticas com a utilização de seixos britados. Entretanto, apesar do benefício econômico na redução do teor de ligante, a textura lisa do agregado resulta em menor resistência ao cisalhamento do pavimento. Por isso, é recomendável a realização do processo de britagem do agregado.

Em termos de normativa, a especificação de serviço DNIT 031/2024 – ES (2024) recomenda o uso do seixo rolado britado. Já as normas dos Departamentos de Estradas de Rodagem (DER) dos estados do Paraná e de São Paulo limitam a utilização do seixo sem britagem. A DER/PR ES-PA 21/23 (2023) especifica que, no caso de emprego de seixos rolados, a porcentagem de faces fraturadas depende do tráfego previsto, variando de 75% a 95% dos agregados com no mínimo uma face fratura e 85% a 90% com duas faces fraturas para os tráfegos mais pesados. Já a Especificação Técnica do DER/SP ET-DE-P00/027 (2005) define que os agregados graúdos devem constituir-se por pedra britada ou seixo rolado britado e, quando obtidos por britagem de pedregulhos, 90% em massa dos fragmentos retidos na peneira de 4,8 mm devem apresentar no mínimo uma face fragmentada pela britagem.

Em se tratando de análise da rigidez da mistura asfáltica, Fakhri e Ahmadi (2017) explicam que, em baixas temperaturas, o efeito da adesão entre o ligante asfáltico e os agregados, no módulo de resiliência são mais importantes que o do intertravamento entre agregados que formam o esqueleto mineral. Assim sendo, para essa variável, a britagem dos seixos não deve gerar diferenças significativas, desde que não haja perda de adesividade.

Como o comportamento mecânico da mistura asfáltica é influenciado pela textura superficial dos agregados que formam seu esqueleto mineral, é essencial

compreender o impacto do uso de seixos rolados, com e sem britagem, para uma seleção adequada dos materiais.

Com o intuito de fornecer subsídios à tomada de decisão quanto à forma de uso dos seixos rolados em concretos asfálticos usados para revestimentos de pavimentos, esse estudo objetivou a análise e a avaliação de viabilidade mecânica por meio dos ensaios de módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral em corpos de prova cilíndricos mediante análise comparativa.

2 METODOLOGIA

Nesta seção são abordados os materiais utilizados na pesquisa, mostrados os principais parâmetros para dosagem da mistura asfáltica e descritos os ensaios de caracterização mecânica dos corpos de prova.

2.1 Materiais utilizados na mistura asfáltica

De modo a atingir os objetivos descritos nesse trabalho, realizou-se pesquisa experimental utilizando amostra de seixo coletada do leito do Rio Ivaí, pelo Porto de Mineração Taquara, localizado na cidade de Santa Isabel do Ivaí, Noroeste do estado do Paraná.

O agregado obtido apresentou granulometria variada e parte da amostra coletada passou pelo processo de britagem, que aconteceu nos britadores da empresa Extracon Mineração e Obras, localizada em Maringá. No processo, foi utilizado um britador cônico que promoveu redução mecânica por impacto.

Os seixos foram classificados, pelo Porto Mineração Taquara, em “Pedrisco Seixo”, cuja maioria das partículas fica retida na peneira de abertura 4,8 mm, e o denominado “Pedra Seixo”, que possui maior quantidade de partículas retidas na peneira 12,7 mm. Ressalta-se que essa classificação é apenas relacionada à granulometria do material, tendo ambos os seixos a mesma origem.

Para a composição da curva granulométrica da mistura, os agregados utilizados foram o seixo, a areia média e a cal hidratada (como fíler e melhorador de adesividade). A areia média utilizada foi fornecida pela empresa Extracon Mineração e Obras e adquirida no Depósito XV de Novembro, localizado em Maringá/PR. Já o fíler adicionado na mistura foi a cal hidratada CH-1, fornecida pela Fircon Construção Civil, que tem sede administrativa em Maringá/PR. A granulometria de cada um dos agregados é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1 – Granulometria dos agregados constituintes da mistura.

ABNT	Peneira Abertura (mm)	Granulometria dos Materiais (Passante)			
		Fíler (%)	Pedrisco seixo (%)	Pedra seixo (%)	Areia (%)
1"	25,4	100,0	100,0	100,0	100,0
3/4"	19,1	100,0	100,0	100,0	100,0
1/2"	12,7	100,0	97,9	64,6	100,0
3/8"	9,5	100,0	94,9	36,5	100,0
N.º 4	4,8	100,0	32,1	7,0	99,8
N.º 10	2,0	100,0	4,3	1,8	98,9
N.º 40	0,42	99,6	1,3	1,2	63,8
N.º 80	0,18	94,3	0,4	0,5	8,3
N.º 200	0,075	92,1	0,1	0,2	2,9

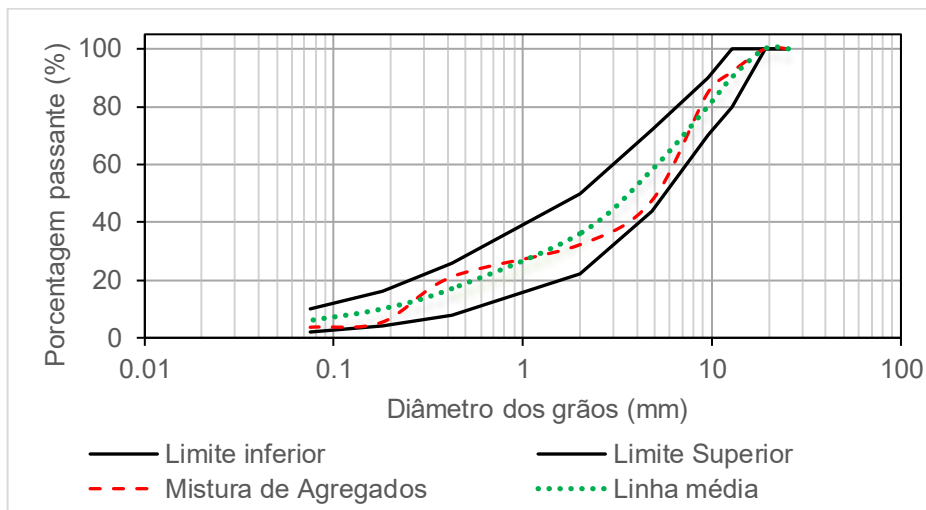
Fonte: Adaptado de DNIT 031/2024 – ES (2024)

A quantidade de cada material foi selecionada de maneira a obter misturas asfálticas enquadradas na faixa C da norma DNIT 031/2024 – ES (2024). Com base nas especificações de granulometria requeridas para tal faixa de trabalho, determinou-se a porcentagem de 3% de fíler, 50% de pedrisco seixo, 20% de pedra seixo e 27% de areia média para composição da mistura. Na Figura 1 são mostrados os limites da faixa C do DNIT e a granulometria final da mistura de agregados.

Para a caracterização do seixo, realizou-se o ensaio de determinação da densidade aparente e absorção do agregado graúdo, seguindo os procedimentos descritos no método de ensaio DNER-ME 081/98 (1998). A densidade aparente encontrada foi de 2,56, com registro de absorção de 0,79%. Além disso, o ensaio de determinação da densidade real do agregado miúdo, de

acordo com a norma DNER-ME 084/95 (1995), foi utilizado para caracterizar a areia, que apresentou densidade igual a 2,67.

Figura 1 – Curva granulométrica da mistura asfáltica e limites da Faixa C do DNIT.



Já o ligante asfáltico utilizado foi o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 50/70, fornecido pela empresa Extracon Mineração e Obras, que adquiriu o material da empresa Novas Técnicas de Asfalto Ltda., localizada em Araucária/PR. Na Tabela 2 é apresentado o resumo dos resultados dos ensaios realizados na caracterização do ligante.

Tabela 2 – Caracterização do ligante asfáltico.

Parâmetro	Unid.	Limites	Resultado	Métodos	
				ABNT	ASTM
Penetração (100 g, 5 s, 25 °C)	0,1 mm	50 a 70	55	NBR 6576 (2007)	D 5
Pto. de amolecimento (mín)	°C	46	50,8	NBR 6560 (2016)	D 36
Susceptibilidade térmica	-	-1,5 a 0,7	-0,77	-	-
Viscosidade Saybolt-Furol (mín)					
135 °C	sSF	141	184	NBR 14950 (2003)	E 102
150 °C	sSF	50	96		
177 °C	sSF	30 a 150	32		

Assim sendo, tanto a curva granulométrica quanto o ligante asfáltico atendem às especificações técnicas.

A curva granulométrica se encontra dentro da faixa C do DNIT, com ênfase para a baixa quantidade de finos, o que resulta em menor consumo de ligante asfáltico.

O ligante asfáltico utilizado neste estudo é classificado como CAP 50/70, conforme especificações técnicas brasileiras. De acordo com os critérios estabelecidos, esse tipo de ligante deve apresentar ponto de amolecimento mínimo de 46 °C, indicando sua resistência ao amolecimento em temperaturas elevadas. Além disso, o índice de suscetibilidade térmica (IST) deve situar-se entre -1,5 e +0,7, refletindo a estabilidade do ligante frente a variações de temperatura. As viscosidades, determinadas por meio do ensaio Saybolt-Furol, devem atender aos seguintes requisitos: mínimo de 141 sSF a 135 °C, mínimo de 50 sSF a 150 °C e estar no intervalo de 30 a 150 sSF a 177 °C, assegurando adequada trabalhabilidade e desempenho durante a mistura e aplicação. Considerando que os valores obtidos nos ensaios atendem plenamente a essas exigências normativas (Tabela 2), tem-se que o ligante asfáltico utilizado apresenta propriedades adequadas para aplicação em pavimentação asfáltica, garantindo desempenho satisfatório tanto em termos de resistência quanto de durabilidade.

2.2 Determinação do teor de ligante de projeto

Para a determinação do teor de ligante de projeto foram moldados 3 corpos de prova pelo método Marshall, para cada teor de ligante, de acordo com os procedimentos descritos em DNIT 447/2024 – ME (2024). Foi utilizado o seixo fraturado para a composição da mistura asfáltica e realizados ensaios com teores de 4,5%, 5,0%, 5,5%, 6,0% e 6,5% em relação à massa total do corpo de prova. A dosagem dos materiais se deu de tal forma que todos os corpos de prova usados na pesquisa apresentaram suas dimensões contidas nos intervalos de 100 mm \pm 2,0 mm para o diâmetro e de 63,5 \pm 2,5 mm para a altura.

De acordo com a especificação de serviço DNIT 031/2006 – ES (2006), a determinação do teor de ligante de projeto deve ser feita de modo que a mistura atenda às restrições e aos limites estabelecidos pelo órgão. Tratando-se de camada de rolamento, a norma especifica que o volume de vazios deve se encontrar entre 3% e 5% e a relação betume-vazios deve estar entre 75% e 82%. Nesse trabalho, a partir do centro dos limites citados, determinou-se como teor de asfalto de projeto aquele necessário para se obter 4% de volume de vazios e 78,5% da relação betume-vazios.

Na Figura 2 e na Tabela 3 encontra-se o resumo dos dados encontrados para o volume de vazios e relação betume-vazios.

Figura 2 – Relação betume-vazios e volume de vazios em função do teor de ligante.

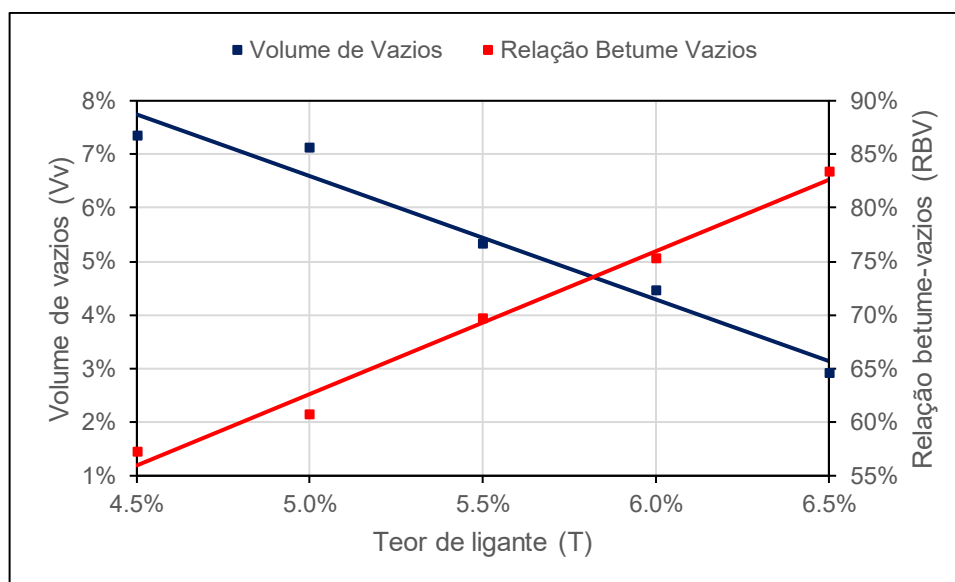


Tabela 3 – Teor ótimo de asfalto adotado

Características	Camada de rolamento	Valor adotado	Teor de asfalto	Teor médio	Teor adotado
Volume de vazios (%)	3 a 5	4	6,1	6,15	6,10
Relação betume-vazios (%)	75 a 82	78,5	6,2		

Com vistas a atender os valores mais próximos dos centros dos intervalos recomendados para Vv e RBV, tem-se o teor de asfalto de projeto igual a 6,10%.

2.2 Ensaios de caracterização mecânica

Neste tópico são abordados os métodos para realização dos ensaios de módulo de resiliência por compressão diametral e resistência à tração por compressão diametral.

O ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral foi realizado para 6 corpos de prova, sendo 3 deles com o uso do seixo no estado natural e outros 3 com o seixo britado. Utilizou-se na confecção de todos os corpos de prova o teor de ligante de projeto de 6,10%.

Para o ensaio de resistência à tração foram utilizados os mesmos corpos de prova, já que o módulo de resiliência foi obtido por meio de um método não destrutivo.

Ressalta-se que os corpos de prova usados para a caracterização mecânica apresentaram suas dimensões contidas nos intervalos de $100 \text{ mm} \pm 2,0 \text{ mm}$ para o diâmetro e de $63,5 \pm 2,5 \text{ mm}$ para a altura.

2.3.1 Módulo de resiliência

De acordo com o método de ensaio DNIT 135/2018 – ME (2018), o módulo de resiliência de misturas asfálticas é a “relação entre a tensão horizontal resultante da carga cíclica e a correspondente deformação horizontal resultante do deslocamento horizontal recuperável (resiliente), por ciclo”.

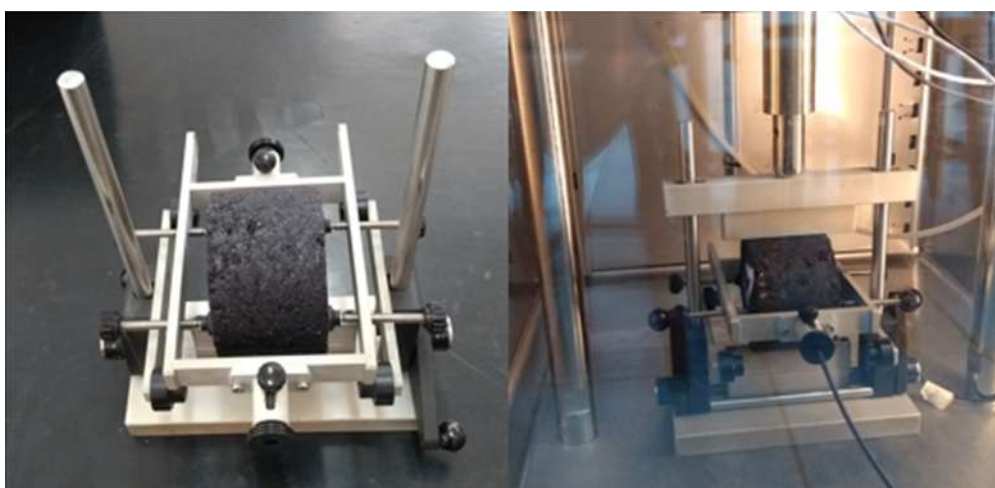
Ooi, Archilla e Sandefur (2004) destacam que o módulo de resiliência é o módulo de elasticidade (E) utilizado para análise mecanicista de pavimentos. Ambos os módulos são definidos como uma relação entre tensão e deformação, porém a principal diferença entre estas grandezas está na forma de carregamento, já que para determinação do módulo de resiliência o procedimento é realizado com carga dinâmica e repetida.

No ensaio, o termo de aplicação de carga reproduz a velocidade de translação dos eixos dos veículos no campo e a frequência simula o número de eixos passantes em determinada seção da rodovia. Para a obtenção desse

parâmetro, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de compressão diametral, com a utilização de aparelhagem composta por sistema pneumático de aplicação de carga com regulador de pressão, cilindro de pressão, pistão de carga, válvula de transmissão de carga vertical, e dispositivo de controle por meio de aparatos eletrônicos e computacionais.

Para estabilização da temperatura, os corpos de prova ficaram por 24 horas acondicionados em 25 °C. Em seguida, os corpos de prova foram colocados, um por vez, centralizados em um suporte com um adaptador para fixá-lo. O conjunto foi levado à câmara de temperatura e foram fixados os transdutores mecânicos-eletromagnéticos do tipo LVDT, os quais são ligados a um aparato eletrônico de controle para aferição dos deslocamentos. Na Figura 3, mostra-se o suporte para o corpo de prova (a) e o conjunto já posicionado na câmara (b).

Figura 3 – (a) Suporte para o corpo de prova e (b) conjunto já posicionado na câmara.



(a)

(b)

A realização do ensaio se deu na temperatura de 25 °C, com ciclos de carregamento a cada 1,0 segundo, com aplicação de carga de 0,1 segundo e recuperação de 0,9 segundo. A carga inicial aplicada foi de 700 N, obtendo-se, assim, valores pequenos de deslocamentos, entre 0,002 mm e 0,003 mm, de modo a se evitar a fadiga dos corpos de prova.

Após efetuar as medições de deformação e força aplicada para os ciclos de carregamento, utilizou-se a Equação 1 para a determinação do módulo de resiliência de cada um dos corpos de prova da mistura asfáltica. O coeficiente de Poisson adotado no experimento foi de 0,30, conforme recomendação do método de ensaio DNIT 135/2018 – ME (2018).

$$MR = \frac{F}{\Delta H} \times (0,9976\mu + 0,2692) \quad (1)$$

Em que, MR: módulo de resiliência (MPa); F: carga vertical repetida diametralmente no corpo de prova (N); Δ : deslocamento elástico, para aplicações da carga (mm); H: altura do corpo de prova (mm); μ : coeficiente de Poisson.

Na Tabela 4 são mostrados os resultados de módulo de resiliência encontrados por autores que também utilizaram o seixo como agregado graúdo. A ampla variação de resultados encontrados por outros autores reforça ainda mais a necessidade de entendimento do que acontece quando do uso de seixos britados ou não britados.

Tabela 4 – Módulo de Resiliência em misturas asfálticas com seixo.

Fonte	MR (MPa)	Observações
Campelo <i>et al.</i> (2019)	3380	Seixo natural e 5,0% CAP 50/70
Souza (2007)	2627	Seixo natural e 5,6% de CAP 50/70
Souza (2007)	2597	Seixo natural e 5,2% de CAP 50/70
Souza (2007)	2518	Seixo britado e 5,4% de CAP 50/70
Santos (2013)	1800	Seixo natural e 5,5 % CAP 50/70

Ressalta-se a importância de se controlar adequadamente os parâmetros de ensaio, dado que o módulo de resiliência é uma importante variável no dimensionamento de pavimentos.

2.3.2 Resistência à tração

O ensaio de tração indireta por compressão diametral, também conhecido como *Brazilian test*, foi desenvolvido por Lobo Carneiro para a determinação da resistência à tração de corpos de prova de concreto de cimento Portland. Posteriormente, o ensaio passou também a ser utilizado em misturas asfálticas. Inicialmente, foram realizadas quatro medições da altura e do diâmetro de cada corpo de prova. O valor adotado para cada dimensão foi a média aritmética dessas medições. Em seguida, os corpos de prova foram mantidos por 24 horas em um local com temperatura controlada de 25 °C para estabilização e homogeneização de sua temperatura.

Na realização do ensaio, cada um dos corpos de prova foi colocado em um suporte com friso para fixação e levado para a prensa, com aplicação de carga à velocidade constante de 0,8 mm/s. Esse carregamento se deu de forma estática, com compressão distribuída ao longo das duas geratrizes opostas dos corpos de prova cilíndricos utilizados no ensaio, o que resulta em um estado de tensões no qual, assumindo algumas considerações de contorno, as tensões de compressão que ocorrem paralelamente à peça implicam em estados de tração na direção perpendicular à carga. Na Figura 4 é mostrado o suporte já posicionado na prensa para a realização do ensaio.

Figura 4 – Prensa para aplicação de carga do ensaio de resistência à tração.



O carregamento foi realizado até a ocorrência da ruptura no corpo de prova, momento esse em que foram obtidos os resultados de carga e de deslocamento. Com a carga de ruptura e os valores de diâmetro e altura foi possível o cálculo da resistência à tração, de acordo com a Equação 2.

$$\sigma_R = \frac{2F}{\pi DH} \quad (2)$$

Em que, σ_R : resistência à tração (MPa); F: carga de ruptura (N); D: diâmetro de corpo de prova (mm); H: altura do corpo de prova (mm).

O procedimento para a obtenção da resistência à tração em corpos de prova de misturas asfálticas é regulamentado pelo método de ensaio DNIT 136/2018 – ME (2018). Na Tabela 5 são mostrados os resultados de resistência à tração encontrados por autores que também utilizaram o seixo como agregado.

Tabela 5 – Resistência à tração em misturas asfálticas com seixo.

Fonte	RT (MPa)	Observações
Campelo <i>et al.</i> (2019)	0,82	Seixo natural e 5,0% CAP 50/70
Silva <i>et al.</i> (2010)	0,80	Seixo natural e 5,78% de CAP 50/70
Silva <i>et al.</i> (2010)	0,87	Seixo natural e 5,78% de CAP 50/70 + Polímero SBS
Souza (2007)	0,77	Seixo natural e 5,6% de CAP 50/70
Souza (2007)	1,03	Seixo britado e 5,4% de CAP 50/70
Santos (2013)	0,64	Seixo natural e 5,5 % CAP 50/70

Nota-se, por meio dos dados de outras pesquisas (Tabela 5), que o uso de britagem nos seixos aumenta a resistência à tração das misturas asfálticas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa seção são mostrados os resultados obtidos por meio dos ensaios descritos no item Ensaios de caracterização mecânica.

3.1 Resultados de módulo de resiliência

Na Tabela 6, encontra-se a média do MR para o seixo britado e natural, e o desvio padrão entre os resultados obtidos para cada caso.

O valor do módulo de resiliência para o seixo britado foi, aproximadamente, 5,0% maior do que para o seixo natural. Essa diferença, porém, está próxima da faixa de desvio padrão do ensaio, podendo-se considerar que não houve diferença significativa de desempenho para o módulo de resiliência entre os dois materiais.

De forma a validar essa afirmação, a partir da constatação de que não há diferença nas variâncias, determinada pelo teste F e, para nível de significância de 5%, realizou-se o teste T, que retornou valor de p igual a 0,1249. Assim sendo, não há diferença significativa entre as médias de MR para as duas condições experimentais.

Esse resultado pode ser explicado, de acordo com Fakhri e Ahmadi (2017), pelo fato que, em baixas temperaturas, o efeito no módulo de resiliência, da adesão entre o ligante asfáltico e os agregados, ser mais importante que o do intertravamento entre os grãos dos agregados.

Tabela 6 – Resultados do ensaio de módulo de resiliência.

CP	Seixo	MR (MPa)	Média MR (MPa)	Desvio Padrão (MPa) (%)	
16		3912			
17	Britado	4183	4116	180,08	4,38
18		4253			
19		3898			
20	Natural	3736	3914	187,03	4,78
21		4109			

O resultado do comparativo entre os materiais é semelhante ao encontrado por Souza (2007), que obteve variação de aproximadamente 3% entre as misturas com a utilização do seixo britado e natural, concluindo que a britagem do material pouco influencia nesse parâmetro mecânico.

3.2 Resultados de resistência à tração

Para o ensaio de resistência à tração foram utilizados os mesmos corpos de prova ensaiados para determinação do módulo de resiliência, tomando-se o cuidado de analisar a RT no mesmo plano de carregamento. Na Tabela 7 estão apresentados os dados coletados na realização do ensaio.

Para determinação da resistência à tração, foram aplicados os dados apresentados na Tabela 7, na Equação 2. Na Tabela 8, mostra-se a média das resistências à tração para o seixo britado e natural, o desvio padrão entre os resultados obtidos para cada caso e os deslocamentos médios no momento da ruptura.

Tabela 7 – Dados coletados no ensaio de resistência à tração.

CP	Seixo	Carga (N)	Deslocamento na ruptura (mm)	Diâmetro (mm)	Altura (mm)
16		11040	1,72	102,20	65,14
17	Britado	10850	2,02	101,80	65,17
18		9990	2,01	101,60	65,13
19		8930	5,62	101,60	64,50
20	Natural	8930	2,23	101,40	64,20
21		9650	1,81	101,60	64,20

Tabela 8 – Resultados do ensaio de resistência à tração.

CP	Seixo	RT (MPa)	RT média (MPa)	Desvio padrão		Deslocamento médio na ruptura (mm)
				(MPa)	(%)	
16		1,056				
17	Britado	1,042	1,020	0,051	5,03	1,92
18		0,961				
19		0,867				
20	Natural	0,873	0,894	0,041	4,61	3,22
21		0,942				

A média dos resultados de resistência à tração foi 14% maior na mistura asfáltica usando o seixo britado quando comparada com a média dos resultados da utilização do seixo natural. Esse valor é expressivo, mostrando melhor desempenho do material britado face à resistência à tração.

O teste F, com nível de significância de 5%, indicou que as variâncias são equivalentes. Com base nisso, o teste T resultou em um valor de p de 0,0151, demonstrando que as médias são estatisticamente diferentes, o que reforça a análise anterior.

O resultado obtido nesse estudo apresentou valores próximos ao 1,03 MPa encontrado por Souza (2007) para o seixo britado e similares ao 0,80 MPa de Silva *et al.* (2010) e 0,82 MPa de Campelo *et al.* (2019) para o seixo natural. Apesar de não ser possível a realização de uma comparação direta, visto que os materiais utilizados possuem natureza distintas e as quantidades dos constituintes da mistura não são as mesmas, nota-se que o comportamento das misturas densas para ambos os materiais é semelhante com o da pesquisa de Souza (2007), já que nos dois estudos a resistência à tração foi maior nos corpos de prova com a utilização do seixo britado.

A norma brasileira DNIT 031/2024 – ES (2024) estabelece o valor mínimo de resistência à tração para o uso em misturas asfálticas igual a 0,65 MPa, em ensaios realizados a 25 °C. Assim, verifica-se que ambas as misturas estudadas apresentaram valores de resistência acima desse valor.

Além do resultado de resistência à tração, Teixeira *et al.* (2019) recomendam o uso de testes de carga dinâmica com uma faixa variável de temperaturas para simular o tempo e os efeitos repetitivos do tráfego, além do acúmulo de tensões de tração nas misturas asfálticas.

Já com relação aos deslocamentos sofridos pelos corpos de prova até o momento da ruptura, percebe-se que as misturas asfálticas dosadas com seixo britado se apresentaram menos deformáveis. Esse resultado, juntamente com a análise do MR e da RT, é um bom indicativo de resistência e durabilidade. Para confirmar essa hipótese, em complemento ao proposto por Teixeira *et al.* (2019) é recomendado realizar ensaios de vida de fadiga e de deformação permanente à tensão controlada.

4 CONCLUSÕES

O presente estudo buscou avaliar a influência do processo de britagem no desempenho das misturas asfálticas por meio de um comparativo dos parâmetros de módulo de resiliência e resistência à tração entre o uso do seixo no estado natural e britado.

No ensaio de módulo de resiliência, os resultados na utilização do seixo de superfície lisa foram semelhantes aos valores encontrados para a mistura asfáltica com o seixo britado, visto que não houve diferença média maior que 5% entre as respostas das misturas.

Já na resistência à tração, observa-se com os valores encontrados, que o processo de britagem do agregado aumenta consideravelmente o desempenho do pavimento quanto a esse parâmetro. Esse resultado era esperado uma vez que as faces fragmentadas proporcionam melhor intertravamento do esqueleto mineral em comparação à textura lisa e de forma arredondada do seixo natural.

Levando-se em consideração os dois parâmetros de caracterização mecânica avaliados nesse trabalho, além do deslocamento medido no ensaio de resistência à tração, a utilização do seixo britado apresentou resultados superiores quando comparados ao natural. Com isso, conclui-se que a britagem do seixo antes da utilização como agregado graúdo pode ser uma das soluções para melhorar o desempenho dos pavimentos.

De modo a serem analisados outros fatores, recomenda-se para trabalhos futuros a análise da vida de fadiga e da deformação permanente, do dano por umidade induzida, o estudo da viabilidade econômica do uso de cada seixo, a análise da variação dos parâmetros volumétricos Marshall com o uso do seixo natural e britado e a variação das propriedades de caracterização mecânica com a utilização de aditivos melhoradores de desempenho.

AGRADECIMENTO

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES).

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6576**: Materiais Asfálticos – Determinação da penetração. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6560**: Ligantes Asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do anel e bola. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14950**: Materiais betuminosos – Determinação da viscosidade Saybolt Furol. Rio de Janeiro, 2003.

CABRAL, G. L. L.; MOTTA, L. M. G.; LOPES, L. A. S.; VIEIRA, A. Calcined clay aggregate: a feasible alternative for Brazilian road construction. *In*: Ellis, E., Yu, H.-S., McDowell, G., Dawson, A.R., & Thom, N. (Eds.). (2008). **Advances in Transportation Geotechnics**: Proceedings of the International Conference. 1st ed. Nottingham, UK: CRC Press, August 2008. pp. 25-27. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203885949>

CAMPELO, N. S.; CAMPOS, A. M. L. S.; ARAGÃO, A. F. Comparative analysis of asphalt concrete mixtures employing pebbles and synthetic coarse aggregate of calcined clay in the Amazon region. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 20, n. 5, p. 507-518, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1309199>

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **DER/SP ET-DE-P00/027**: Concreto asfáltico. São Paulo, 2005.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ. **DER/PR ES-PA 21/23**: Pavimentação: Concreto asfáltico, usinado à quente. Paraná, 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 447/2024 – ME (2024)**: Misturas asfálticas – Ensaio de estabilidade e fluência Marshall. Rio de Janeiro, 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 081/98**: Agregados - determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 084/95**: Agregado miúdo - determinação de densidade real. Rio de Janeiro, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.
DNIT 031/2006 – ES: Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.
DNIT 135/2018 – ME: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.
DNIT 136/2018 – ME: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.
DNIT 031/2024 – ES: Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico. Rio de Janeiro, 2024.

FAKHRI, M.; AHMADI, A. Recycling of RAP and steel slag aggregates into the warm mix asphalt: A performance evaluation. **Construction and Building Materials**, v. 147, p. 630-638, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.117>

OOI, P. S. K.; ARCHILLA, A. R.; SANDEFUR, K. G. Resilient modulus models for compacted cohesive soils. **Transportation Research Record**, v. 1874, n. 1, p. 115-124, 2004. DOI: <https://doi.org/10.3141/1874-13>

PAZOS, A. G.; SACRAMENTO, F. T; MOTTA, L. M. G. Efeitos de propriedades morfológicas de agregados no comportamento mecânico de misturas asfálticas. *In*: 44ª RAPV – REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: RAPv, 2015.

SANTOS, M. G. R. **Estudo de Agregado Sintético de Argila Calcificada para Uso em Revestimentos asfálticos em Manaus**. 2007. 118p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

SILVA, A. C. L.; FROTA, C. A. Estudo da viabilidade econômica para produção de agregado sinterizado de argila calcificada. **Revista Cerâmica**, v. 59, n. 352, p. 508-517, 2013.

SILVA, L. C. P; SOUZA, R. J. Q.; CUNHA, T. M. F; FROTA, C. A. Avaliação da resistência à tração de misturas asfálticas utilizando agregado regional e ligante modificado com SBS para Manaus – AM. 2010. Congresso de Infraestrutura de Transportes (CONINFRA), 4. Vol. 1, **Anais...**, São Paulo, SP, Brasil, 2010.

SOUZA, J. B. Q. **Comportamento de misturas asfálticas a quente com agregados provenientes de jazidas de seixo do estado do Pará.** 2007. 404p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

TEIXEIRA, J. E. S. L., SCHUMACHER, A. G., PIRES, P. M., CASTELO BRANCO, V. T. F., MARTINS, H. B. Expansion Level of Steel Slag Aggregate Effects on Both Material Properties and Asphalt Mixture Performance. **Transportation Research Record**, v. 2673, n. 3, p. 506-515, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1177/0361198119835513>