CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
ENGENHARIA DE TRANSPORTES

CAROLINA MOREIRA DE LIMA

ESTUDO DA VIABILIDADE DO EMPREGO DE RESÍDUOS DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE POR VIA SECA EM MISTURAS ASFÁLTICAS À QUENTE

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

BELO HORIZONTE
2019

CAROLINA MOREIRA DE LIMA

ESTUDO DA VIABILIDADE DO EMPREGO DE RESÍDUOS DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE POR VIA SECA EM MISTURAS ASFÁLTICAS À QUENTE

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso II, do curso de Graduação em Engenharia de Transportes do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. MSc. Ana Carolina da Cruz Reis.

BELO HORIZONTE
2019

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

ANEXO V – FOHA DE NOTAS

ESTUDO DA VIABILIDADE DO EMPREGO DE RESÍDUO DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE POR VIA SECA EM MISTURA ASFÁLTICA À QUENTE

CAROLINA MOREIRA LIMA

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Comissão Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Graduação em Engenharia de Transportes, **APROVADO** como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Transportes.

__✓__ Aprovada em 06 de dezembro de 2019.

___ Aprovada com modificações sugeridas pela banca em 06 de dezembro de 2019.

____ *Aprovada com ressalvas em 06 de dezembro de 2019

____ Reprovada

Belo Horizonte, 06 de dezembro de 2019.

_____ NOTA: 95,0
ORIENTADORA
Profa. MSc. Ana Carolina da Cruz Reis
CEFET-MG

_____ NOTA: 95
Profa. MSc. Priscila de Souza Maciel
CEFET-MG

_____ NOTA: 85
Profa. MSc. Guilherme Ebani Jacques
VIA 040

NOTA FINAL 92,0

Aprovada na 26° Reunião do Colegiado do curso de graduação em Engenharia de Transportes

Dedico este trabalho aos meu pais que foram morar no céu, Célia e Lima, e aos meus pais de coração, Joaquina e Francisco.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por sua infinita misericórdia, por seu imenso amor e por ser meu alfa e ômega em todos os momentos.

Agradeço a mim mesma por mais essa vitória e pela mulher que me tornei: determinada, perseverante e guerreira.

Aos meus pais que formam morar no céu, Célia e Lima, pois sei que nesse momento devem estar orgulhosos dos frutos que gerei e aos meus pais do coração, Joaquina e Francisco, pelos princípios ensinados, por nunca me desampararem e por todo amor me ofertado.

Aos meus familiares, por acreditarem no meu potencial, principalmente, aos meus tios, Ronaldo, Adriana, Marcos, Valdineia, Aparecida M., Aparecida N., Clementina e Gislene, aos meus irmãos, Kleber, Wellington, Bruno e Luciano, as minhas primas que considero como irmãs, Júlia, Jéssica, Bruna, Bárbara, Brenda e Lorena e todos que contribuíram para fazer essa realização possível.

Aos meus companheiros da faculdade, em especial ao meu grande amigo Arthur Andrade por escutar, entender e aconselhar em todas as áreas da minha vida, uma tarefa nada fácil.

Aos meus professores e a instituição, que não só me fizeram engenheira, mas me tornaram um ser humano melhor.

À minha orientadora, Ana Carolina da Cruz Reis, a minha eterna gratidão por não apenas me orientar e ensinar, mas por todo carinho, amor e cuidado.

Aos parceiros que tornaram minha pesquisa e ensaios exequíveis, em especial ao Richard, Walyson, Gilson, Paulo e Camila.

Aos meus colegas de trabalho do grupo Invepar, em especial aos que me dedicaram tempo, paciência e conhecimento quando estagiária, Diego, Vinicius, Thiago, Rodolfo e Luiz e aos gestores atuais, Débora e André, por toda confiança depositada e me fazerem um profissional melhor a cada dia.

À banca avaliadora, por sua disponibilidade e cooperação.

Enfim, a todos que de certo modo fizeram parte desses 5 anos de graduação e me propiciaram alcançar esse sonho!

“Todo o conhecimento humano começou com intuições, passou daí aos conceitos e terminou com ideias. ”

Immanuel Kant

RESUMO

LIMA, Carolina Moreira de. **Estudo da viabilidade do emprego de resíduos de polietileno de alta densidade por via seca em misturas asfálticas à quente**. 2019. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia de Transportes. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2019.

A modificação de misturas asfálticas à quente ou concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ) por meio da inserção de polímeros reciclados pode contribuir positivamente para um pavimento com vida útil maior e minimizar o impacto gerado por esses resíduos sólidos urbanos. Em virtude de desenvolver um pavimento com a visão sustentável, este trabalho teve como meta verificar a viabilidade do emprego de resíduos de polietileno de alta densidade (PEAD) por via seca em misturas asfálticas à quente. Para isso, foi necessário realizar a caracterização dos materiais constituintes do esqueleto das misturas, agregados convencionais oriundos da Pedreira Martins Lanna e agregado alternativo (reciclado de PEAD) proveniente de uma recicladora em Belo Horizonte, e enquadrá-los numa faixa granulométrica segundo as especificações técnicas do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). A partir dos dados obtidos em laboratório fez se uso da metodologia de dosagem Marshall para encontrar o teor ótimo de ligante para as duas composições asfálticas avaliadas, ambas obtiveram o mesmo teor de 4,5% de betume. Por meio dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral e de estabilidade Marshall foi possível comparar o desempenho mecânico entre elas. Os resultados apresentados pelo CAUQ modificado foram superiores ao composto formado apenas por agregados convencionais, sendo favorável para a utilização de PEAD.

Palavras-chave: Pavimentação. Polietileno de alta densidade. PEAD. Agregado alternativo. Reciclagem. Via seca.

ABSTRACT

LIMA, Carolina Moreira de. **Feasibility study of the use of dry process high-density polyethylene residues in hot mix asphalt**. 2019. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia de Transportes. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2019.

Modifying hot mix asphalt (HMA) by inserting recycled polymers can positively contribute to a longer life cycle of pavement and minimize the impact of these urban solid wastes. In order to develop a sustainable pavement, this work aimed to verify the feasibility of dry process high-density polyethylene (HDPE) residues in hot mix asphalt. For this, constituent materials of the 'skeleton' of the mixtures, which are the conventional aggregates (from Pedreira Martins Lanna) and an alternative aggregate (HDPE recycled, from a Reclycler Belo Horizonte) were characterized in accordance with technical specifications for particle size range from National Transport Infrastructure Department (DNIT). From the data obtained in the laboratory, the Marshall dosing methodology was used to find the optimal binder content for the two evaluated asphalt compositions, which was 4.5% bitumen content for both samples. Through the tensile strength test by diametrical compression and Marshal stability test it was possible to compare the mechanical performance between the two mixture compositions. The modified HMA presented superior performance when compared to the compound using only conventional aggregates, indicating the potential of recycled HDPE as pavement constituent.

Keywords: Paving. High-density polyethylene. HDPE. Alternative aggregate. Recycle. Dry process.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Tipo de Pavimentos....18
Figura 2: Seção transversal do pavimento flexível asfáltico....19
Figura 3: Produção de derivados não energéticos do Petróleo em 2018....21
Figura 4: Classificação dos agregados....22
Figura 5: Compactador Giratório Superpave (Matest)....25
Figura 7: Processo simplificado da reciclagem de polímeros....34
Figura 8: Simbologia dos códigos de identificação de materiais plásticos....34
Figura 9: Fases da pesquisa....35
Figura 10: Brita 0....36
Figura 11: Pó de pedra....37
Figura 12: PEAD reciclado....37
Figura 13: Cal hidratada....37
Figura 14: Cimento asfáltico de petróleo - CAP 30/45....40
Figura 15: Preparo da mistura asfáltica pelo método Marshall....43
Figura 16: Corpos de prova em Banho Maria....43
Figura 17: Obtenção da altura (h) e diâmetro (d) do CP para o ensaio de RT....45
Figura 18: Prensa para ensaio de resistência à tração por compressão diametral....45
Figura 19: Corpos de prova moldados....52
Figura 20: Propriedades volumétricas da mistura - Traço A....53
Figura 21: Propriedades volumétricas da mistura - Traço B....54

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Resultado granulométrico dos agregados....49
Gráfico 2: Enquadramento granulométrico - Traço A....50
Gráfico 3: Enquadramento granulométrico - Traço B....52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Faixas granulométricas - DNIT....31
Tabela 2: Materiais utilizados....36
Tabela 3: Massa mínima por amostra de ensaio - análise granulométrica....38
Tabela 4: Caracterização do ligante asfáltico....41
Tabela 5: Faixa C - DNIT....41
Tabela 6: Fator de correção - Estabilidade Marshall....47
Tabela 7: Resultado granulométrico dos agregados....48
Tabela 8: Massa específica dos materiais....49
Tabela 9: Composição granulométrica - Traço A....50
Tabela 10: Composição granulométrica - Traço B....51
Tabela 11: Propriedades volumétricas da mistura - Traço A....53
Tabela 12: Propriedades volumétricas da mistura - Traço B....54
Tabela 13: Resultados dos ensaios mecânicos....55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Norma Técnicas

ANP – Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

CAUQ – Concreto Asfáltico Usinado a Quente

CEFET-MG – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

CNT – Confederação Nacional do Transporte

CP – Corpo de Prova

DER-SP – Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo

DMT – Densidade Máxima Teórica da mistura

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte

FHWA – *Federeal Highway Administration*

FRN – Fundo Rodoviário Nacional

G_{mb} – Densidade Aparente da mistura

PE – Polietileno

PEAD – Polietileno de Alta Densidade

RBV – Relação betume vazios

RT – Resistência à tração

RTFOT – *Rolling Thin Film Oven Test*

SHRP – *Strategic Highway Research Program*

TFO – *Thin Film Oven*

VAM – Vazios do agregado mineral

VCB – Vazios cheio de betume

V_{ar} – Volume de ar na mistura

V_{be} – Volume do asfalto efetivo

V_v – Volume de vazios na mistura compactada

WES – *Waterways Experiment Station*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 12
1.1 Justificativa 13
1.2 Objetivos 15
1.2.1 Objetivo geral 15
1.2.2 Objetivos específicos 15
2 REFERENCIAL TEÓRICO 16
2.1 Breve histórico da pavimentação asfáltica 16
2.2 Tipos de pavimento 17
2.2.1 Pavimentos flexíveis 18
2.3 Ligantes asfálticos 20
2.4 Agregados 22
2.5 Dosagem asfáltica 24
2.5.1 Método de dosagem Marshall 27
2.5.2 Propriedades volumétricas das misturas asfálticas 29
2.5.3 Seleção granulométrica 30
2.6 Pavimentação e agregados reciclados 31
2.6.1 Polietileno de alta densidade (PEAD) 33
3 MATERIAIS E MÉTODOS 35
3.1 Fase 1: Seleção e caracterização dos materiais 36
3.1.1 Agregados 36
3.1.2 Ligante asfáltico 40
3.2 Fase 2: Escolha da faixa granulométrica 41
3.3 Fase 3: Dosagem asfáltica 42
3.4 Fase 4: Estudo das propriedades mecânicas 44
3.4.1 Resistência à tração por compressão diametral 44
3.4.2 Estabilidade Marshall 46
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS 48
4.1 Fase 1: Seleção e caracterização dos materiais 48
4.2 Fase 2: Escolha da faixa granulométrica 50
4.3 Fase 3: Dosagem asfáltica 52
4.4 Fase 4: Estudo das propriedades mecânicas 55

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 56
REFERÊNCIAS.....57

1 INTRODUÇÃO

As principais funções técnicas da estrutura de um pavimento são de resistir e distribuir os esforços verticais provenientes do tráfego; melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e segurança; e resistir aos esforços horizontais de desgaste, tornando a superfície de rolamento com maior vida útil (FALEIROS, 2005).

De acordo com os dados da 22ª Pesquisa de Rodovias da Confederação Nacional de Transportes de Rodovias (CNT, 2018) o Brasil possui 1.720.756 km de rodovias, das quais apenas 211.468 km são pavimentados (12,3%). Os resultados da pesquisa apontam que ao avaliar cerca de 107.181 km, notou-se que há problemas em 75,9% (81.351 km) do total, sendo identificado as seguintes patologias: desgaste em 52,8% (56.582 km) da extensão avaliada; trinca em malha ou remendo em 18,9% (20.304 km); afundamentos, ondulações ou buracos em 3,4% (6.644 km); e 0,8% (821 km) está totalmente destruído.

Segundo Bernucci et al. (2008) os defeitos de superfície do pavimento podem surgir precocemente, devido a erros ou inadequações, a médio ou longo prazo proveniente da utilização pelo tráfego e dos efeitos das intempéries. Entre os erros ou inadequações que levam à redução da vida de projeto, evidenciam-se os seguintes fatores, agindo separada ou conjuntamente:

- Erros de projeto;
- Erros ou inadequações na seleção, na dosagem ou na produção de materiais;
- Erros ou inadequações construtivas;
- Erros ou inadequações nas alternativas de conservação e manutenção.

Atualmente, a utilização de asfalto modificado tem sido uma alternativa amplamente empregada para melhorar as características apresentadas por misturas asfálticas convencionais. Em geral, procura-se melhorar as propriedades mecânicas e reológicas de asfaltos, como: susceptibilidade térmica, rigidez e resistência ao envelhecimento, a deformações plásticas e fadiga. Para modificar essas propriedades, pode-se adicionar ao asfalto (via úmida) ou nas misturas asfálticas (via seca) aditivos poliméricos provenientes de resíduos industriais ou urbanos, com o intuito de reduzir o impacto ambiental que esses produzem (QUINTANA et al., 2009).

Ainda não existe tecnologia suficiente e adequada para tratar ou eliminar o acúmulo de resíduos gerados pelas atividades voltadas para a qualidade da vida humana e desse modo encontrar métodos apropriados de eliminação, que não comprometem a qualidade do meio ambiente é um tema relevante no cenário atual, evidenciado pelos estudos de materiais alternativo por grandes centros de pesquisa (REZENDE et al., 2014).

Conforme Cruz et al. (2008) a falta de gerenciamento apropriado para os resíduos urbanos tem colaborado para agravar os problemas ambientais. Cerca de 30% do total de plásticos provenientes dos resíduos sólidos urbanos no Brasil são compostos por Polietileno de Alta Densidade (PEAD). O PEAD, como a maioria dos plásticos, possui uma baixíssima degradabilidade, sendo fundamental o estudo da viabilidade técnica e econômica da sua reciclagem.

Normalmente, o polietileno de alta densidade é empregado na fabricação de engradados para bebidas, recipientes de álcool e de produtos químicos, baldes, tambores, tubulações para líquidos e gás, tanques de combustível, embalagens de leites, sucos, óleos lubrificantes, agrotóxicos, entre outros. E, devido às suas propriedades mecânicas e à sua expressiva disponibilidade nos resíduos sólidos urbanos, vem se tornando um dos plásticos mais reciclados e aplicados em diversos setores como: pavimentação, construção civil, plasticultura, embalagens flexíveis e indústria automobilística. Entretanto, essa cultura ainda é incipiente no Brasil (CANDIAN, 2007).

1.1 Justificativa

Segundo a análise dos resultados da série histórica entre 2004 e 2016 das pesquisas CNT de Rodovias (CNT, 2017), a qualidade do pavimento das rodovias tem impacto direto no desempenho do transporte rodoviário e na economia do Brasil, confirmado por uma infraestrutura com qualidade inadequada e quantidade insuficiente, o que afeta negativamente a eficiência do serviço. Ademais, implica-se que uma rodovia com más condições de superfície aumenta o custo operacional do transporte, diminui o conforto e a segurança dos passageiros e das cargas, além de provocar prejuízos ambientais.

Outro problema inerente ao Brasil e que também provoca prejuízos ambientais é o mal gerenciamento de resíduos sólidos urbanos. Segundo a política nacional dos resíduos sólidos, lei nº 12.305/2010, a gestão de resíduos sólidos se baseia no conjunto de ações exercidas, direta ou indiretamente, nas fases de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (BRASIL, 2010).

Conforme Pereira (2012) um dos principais desafios ambientais encarados pelo mundo é o gerenciamento eficaz de resíduos sólidos, devido a sua ampla produção e diversidade, tornando cada vez mais difícil proporcionar um destino ecologicamente correto e sustentável. Desta forma, a incorporação de resíduos sólidos como agregados alternativos nas misturas asfálticas pode contribuir para mitigar os impactos ambientais gerados por eles e aumentar a qualidade do asfalto.

A partir de 1920 com o aumento do número de automóveis exigiu-se o desenvolvimento de revestimentos asfálticos mais resistentes e duráveis demandando uma metodologia apropriada de dosagem para a formulação das misturas asfálticas (LEANDRO, 2016). A finalidade dos métodos de dosagem asfáltica é obter o teor de ligante “ótimo” para uma dada granulometria a partir de um método de compactação que resulte em corpos de prova com densidades semelhantes àquelas encontradas em campo (SOUSA et al., 1991).

De acordo com Cunha et al. (2004) a performance de uma mistura asfáltica está relacionada com a sua distribuição granulométrica. Ela influencia na maioria das propriedades importantes de uma mistura asfáltica, como a estabilidade, a durabilidade, a permeabilidade, a trabalhabilidade, a resistência à fadiga, a resistência à deformação permanente e a resistência aos danos causados pela umidade. Por conseguinte, a distribuição granulométrica apropriada ao tipo de mistura asfáltica que se quer produzir é a base para que esta apresente um bom desempenho no campo.

Nesse contexto, justifica-se o propósito deste projeto em compreender os efeitos e as peculiaridades ao utilizar agregados alternativos provenientes da reciclagem de PEAD, de modo a analisar a influência do esqueleto mineral nas misturas asfálticas à quente, em relação ao desempenho mecânico.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo principal dessa pesquisa é comparar o desempenho mecânico de misturas asfálticas à quente, dosadas pelo método Marshall, cujo esqueletos foram compostos por agregados convencionais e com agregados reciclados de polietileno de alta densidade.

1.2.2 Objetivos específicos

Sabido o propósito fundamental desse estudo e visando alcançá-lo julga a necessidade de cumprir com os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar o agregado convencional e o agregado alternativo reciclado de PEAD para escolha da faixa granulométrica a ser utilizada na mistura asfáltica;
- Escolher a faixa granulométrica a ser empregada na mistura asfáltica;
- Caracterizar o ligante asfáltico a ser usado na composição asfáltica;
- Obter o teor de ligante “ótimo” para a mistura asfáltica utilizando a dosagem pelo método Marshall; e
- Comparar o desempenho das misturas asfálticas através dos resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral e estabilidade Marshall.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Breve histórico da pavimentação asfáltica

De acordo com Bernucci et al. (2008) percorrer a história da pavimentação remete cruzar à própria história da humanidade, passando pelo povoamento dos continentes, conquistas territoriais, intercâmbio comercial, cultural e religioso, urbanização e desenvolvimento. Assim como os pavimentos, a história também é elaborada em camadas e, constantemente, as estradas formam um caminho para consultar o passado, sendo evidenciado pelo fato de ser uma das primeiras buscas dos arqueólogos nas explorações de civilizações antigas.

No Egito Antigo utilizava-se asfalto como material nos processos de mumificação. Já como material de construção, os primeiros usos foram imputados aos Romanos no ato de impermeabilizar as suas áreas de banho e vedar as conexões hidráulicas dos sistemas de distribuição de água. Entre os séculos XV e XVI, no período das grandes navegações, os asfaltos eram aplicados na manutenção das embarcações e durante o final do século XIX, ocorreram as primeiras empregabilidades do asfalto na construção rodoviária (ROBERTS et al., 2002).

Segundo o *Asphalt Institute* (1973) o primeiro pavimento com revestimento betuminoso foi construído em 1870, na cidade de Newark, New Jersey (EUA), por intermédio do químico belga E. J. DeSmedt. As misturas asfálticas foram patenteadas e fabricadas com asfalto natural de Trinidad e Tobago, na década de 1880, nos Estados Unidos. Sendo o asfalto carregado em barris até o local de construção e então misturado com agregados locais em proporções baseadas na experiência dos patenteadores.

No Brasil, a primeira experiência de porte expressivo na pavimentação decorreu durante o século XX, onde era comum usar o termo “macadamizar”, significando a execução de camada de macadame hidráulico ou betuminoso. O grande impulso na construção rodoviária brasileira aconteceu nas décadas de 1940 e 1950, devido à criação do Fundo Rodoviário Nacional (FRN) em 1946, proveniente do imposto sobre combustíveis líquidos. Além disso, ressalta-se ainda o ano de 1950 como o início da execução de pavimentos em escala industrial e da organização de

grandes firmas construtoras e a criação da Petrobras em 1953 (BALBO, 2007; BERNUCCI et al., 2008; PREGO, 2001).

2.2 Tipos de pavimento

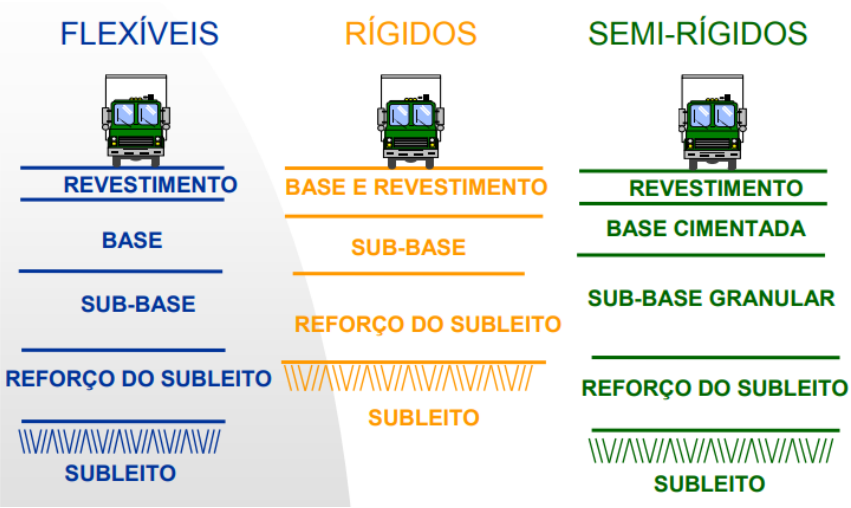
Bernucci et al. (2008) define pavimento como um arranjo de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços provenientes do tráfego de veículos e do clima, e a oportunizar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança.

Conforme o Manual de Pavimentação (DNIT, 2006a) o pavimento, por imposições do tipo técnico-econômicas é um sistema de camadas em que materiais de diversas resistências e deformabilidades são colocadas em contato ocasionando um elevado grau de complexidade no que diz respeito ao cálculo de tensões e deformações atuantes nas mesmas resultantes das cargas conferidas pelo tráfego. E, geralmente, são conhecidos três tipos de pavimentos, como ilustra a

Figura 1, denominados de:

- Rígidos: revestimento que possui elevada rigidez em relação às camadas inferiores, de forma que absorve a maioria das tensões oriundas dos carregamentos aplicados, por exemplo, pavimentos cujo revestimento é feito de concreto de cimento Portland;
- Flexíveis: pavimento no qual todas as camadas sofrem deformação elástica significativa, proveniente do carregamento que exerce uma tensão sobre a mesma, sendo as cargas se distribuídas ao longo das camadas de forma equivalente. Exemplo típico: pavimento constituído por uma base de brita (brita graduada, macadame) ou por uma base de solo pedregulhoso, revestida por uma camada asfáltica;
- Semirrígidos: base cimentada por algum aglutinante com propriedades características da cimentação, como pavimentos onde uma camada é de solo cimento e a outra de material asfáltico.

Figura 1: Tipo de Pavimentos



Fonte: Adaptado de Adada, 2008.

2.2.1 Pavimentos flexíveis

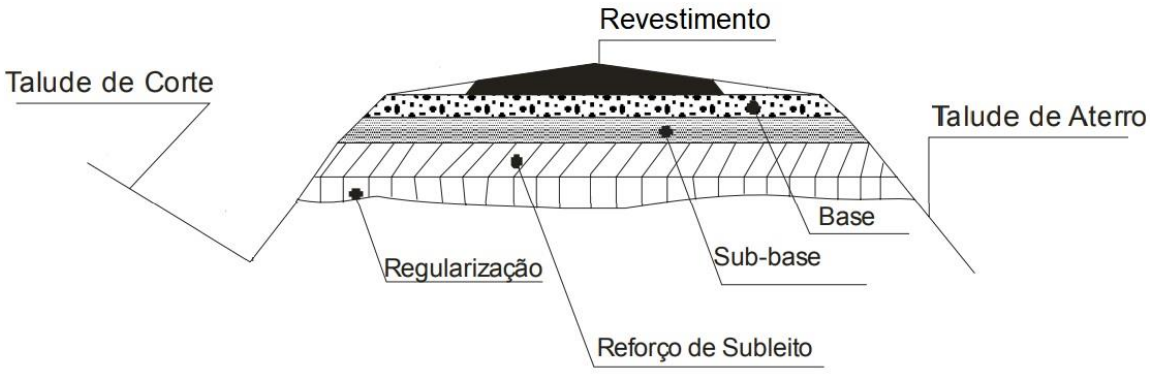
Os pavimentos flexíveis também conhecidos como pavimentos asfálticos levam essa denominação por serem compostos de várias camadas, sendo que todas sofrem deformação elástica significativa. Desta forma, a carga decorrente do tráfego se distribui de forma quase equivalente entre elas, o que permite observar um campo de tensões muito concentrado nas proximidades do ponto de aplicação da carga. Esse tipo de pavimento é executado normalmente com revestimento betuminoso sobre camadas puramente granulares, sendo o processo executivo do revestimento mais comum encontrado nas rodovias brasileiras, o de concreto asfáltico usinado a quente, CAUQ (CNT, 2017).

Segundo Departamento de Estrada e Rodagem de São Paulo (DER-SP, 2006) os esforços provenientes do tráfego no pavimento flexível são absorvidos pelas diferentes camadas integrantes da sua estrutura. Sendo normalmente composto por revestimento asfáltico sob camada de base granular ou sob camada de base de solo estabilizado granulometricamente.

Basicamente, a classificação do pavimento dependerá da deformabilidade das camadas constituintes e das propriedades dos materiais utilizados para compô-las. Um pavimento flexível convencional deterá uma seção transversal constituída de uma fundação e de camadas com espessuras e materiais definidos por meio dos

métodos de dimensionamento, sendo tradicionalmente empregada uma estrutura dividida em: revestimento ou camada de rolamento, base, sub-base, reforço de subleito e subleito, evidenciada na Figura 2 (RIBEIRO, 2017; SENÇO, 1997).

Figura 2: Seção transversal do pavimento flexível asfáltico



Fonte: DNIT, 2006.

Conforme o glossário de termos técnicos rodoviários do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT, 2017), as camadas são definidas como:

- Subleito: maciço de terra que serve de fundação para o pavimento ou revestimento;
- Reforço de subleito: camada granular do pavimento realizada com o intuito de melhorar a capacidade de suporte de carga do subleito e de diminuir espessura da sub-base;
- Sub-base: camada corretiva do subleito e complementar à base, com as mesmas funções desta, e preparada quando, por razões de ordem econômica, for conveniente restringir a espessura de base;
- Base: camada destinada a resistir aos esforços verticais oriundos dos veículos, distribuindo-os ao subleito, e sobre a qual se constrói o revestimento; e
- Revestimento: camada mais acima do pavimento, que recebe diretamente as ações verticais e horizontais dos veículos, e reservada a melhorar as condições do rolamento quanto ao conforto e segurança.

Os pavimentos asfálticos são analisados como um sistema de camadas, o que dificulta para determinar o estado de tensão, deformação ou ruptura em um ponto qualquer do mesmo, quando este for solicitado por uma carga qualquer. Consequentemente, sob o ponto de vista estrutural no caso dos pavimentos flexíveis, o fator decisivo do comportamento do sistema é exatamente a tensão vertical de compressão no subleito, ou seja, a sua capacidade de suporte (CARVALHO, 1999).

Com base na norma DNIT-ES 031/2006 desde que siga rigorosas especificações presentes na norma, o concreto asfáltico pode ser empregado como revestimento, base, regularização ou reforço do pavimento e camada de ligação ou binder, a qual está localizada entre a base e a capa de rolamento e é empregada quando a espessura solicitada para o revestimento asfáltico for elevada (DNIT, 2006c).

No âmbito econômico, o pavimento flexível tem menor investimento no período de implantação, aproximadamente 42% mais barato que o pavimento rígido, sendo amplamente mais utilizado no Brasil. O cimento asfáltico usinado a quente é o mais nobre dos revestimentos flexíveis, o qual trata-se do produto da mistura convenientemente proporcionada de agregados de vários tamanhos e cimento asfáltico, ambos aquecidos em temperaturas previamente escolhidas, em função da característica viscosidade-temperatura do ligante (BERNUCCI ET AL., 2008; FILHO, 2018).

2.3 Ligantes asfálticos

Os asfaltos são definidos como elementos aglutinantes de cor escura constituído principalmente por hidrocarbonetos de alta massa molecular, totalmente solúvel em dissulfeto de carbono. Eles podem ser encontrados em depósitos naturais, na forma de bolsões de asfaltos, gerados da evaporação das frações mais leves e mais voláteis do petróleo, aflorados à superfície em épocas longínquas. Ultimamente, a maioria da produção de asfalto é resultante da destilação de petróleo em refinarias (DIAS, 2005).

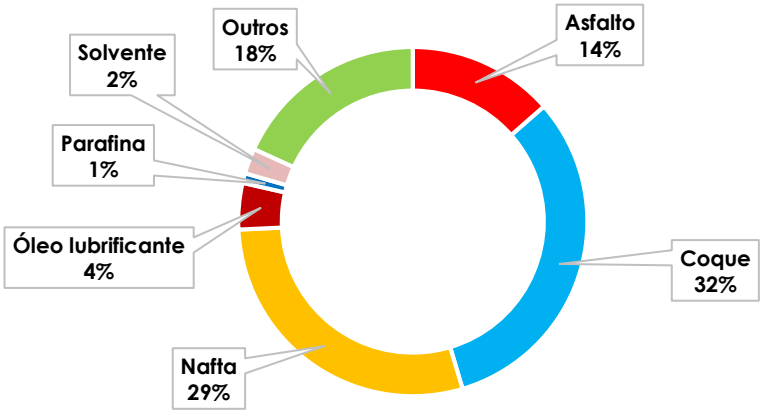
O Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) é insolúvel em água, e não flui na temperatura ambiente, sendo preciso o aquecimento para obter consistência adequada, permitindo o cobrimento dos agregados pétreos e aplicação sobre o

pavimento. Além disso, é um material que sofre modificações químicas quando exposto à radiação solar, às ações de óleos, graxas, lubrificantes e combustíveis dos veículos que trafegam pelas rodovias (ABEDA, 2001; BALBO, 2007).

Conforme afirmam Ceratti e Reis (2011) o CAP é obtido por meio do refino do petróleo, o qual possuem alta concentração de betume, levando a ser denominado, na maioria das vezes, como betume. O asfalto proporciona uma forte união dos agregados, é durável e resistente à ação da maioria dos ácidos, dos álcalis e dos sais, pode ser aplicado aquecido ou emulsionado, entre diversas outras características que justificam a vasta utilização deste material na pavimentação.

No ano de 2018, o Brasil contava com 17 refinarias de petróleo, com competência para processar 2,4 milhões de barris/dia. Treze dessas refinarias pertencem à Petrobras e são responsáveis por 98,2% da capacidade total, sendo a Replan (SP) a de maior capacidade instalada. Como ilustra a Figura 3, cerca de 14% da produção de derivados não energéticos do petróleo em 2018 foi de asfalto.

Figura 3: Produção de derivados não energéticos do Petróleo em 2018



Fonte: Adaptado de ANP, 2019.

Bernucci et al. (2008) declara que o ligante asfáltico empregado na pavimentação é um ligante betuminoso que possui propriedades como: impermeabilidade à água, pouco reatividade, adesiva termoviscoplástica e termoviscoelasticidade, evidenciada no comportamento mecânico desse material, sendo apto à velocidade, ao tempo e à intensidade de carregamento, e à temperatura de serviço.

2.4 Agregados

Associação Brasileira de Norma Técnicas (ABNT, 2011) define o termo agregado como material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para produção de argamassas e de concreto. Os agregados podem ser classificados segundo ilustra a Figura 4, quanto à natureza:

Figura 4: Classificação dos agregados

Agregado	Quanto à natureza	Agregado natural
		Agregado artificial
		Agregado Reciclado
	Quanto ao tamanho	Agregado gráudo
		Agregado miúdo
		Agregado de enchimento
	Quanto à distribuição dos grãos	Graduação densa ou bem-graduada
		Graduação aberta
		Graduação uniforme
		Graduação com degrau ou descontínua

Fonte: Adaptado de DNIT, 2006.

- Natural: material pétreo granular que pode ser usado como é e encontrado na natureza, sendo permitido a submissão à lavagem, classificação ou britagem, como exemplo: seixo rolado, areia de rio e areia de campo;
- Artificial: material granular proveniente do processamento industrial, no qual ocorre alteração mineralógica, química ou físico-química da matéria-prima original, por exemplo: escória de alto forno e argila expandida; e
- Reciclado: material granular resultante do processo de reciclagem de rejeitos ou subprodutos da produção industrial, mineração ou construção ou demolição da construção civil.

Em função ao tamanho (DNIT, 2006a):

- Graúdo: materiais que passam na peneira com abertura de 2” (50,8 mm) e ficam retidos na peneira Nº 10 (2,0 mm);
- Miúdo: grãos que passam na peneira Nº 10 (2,0 mm) e ficam retidos na peneira Nº 200 (0,074 mm); e
- Material de enchimento: materiais que passam na peneira Nº 200 (0,074 mm).

E, em relação à distribuição dos grãos (Bernucci et al. 2008):

- Graduação densa ou bem-graduada: agregados que detém disposição granulométrica contínua;
- Graduação aberta: agregados que possuem distribuição granulométrica contínua, entretanto tem carência de material fino;
- Graduação uniforme: agregados que apresentam a maior parte de seus elementos com dimensões em uma faixa bastante estreita; e
- Graduação com degrau ou descontínua: agregados que portam baixa porcentagem de agregados com tamanhos intermediários.

Pazos (2015) afirma que os agregados são normalmente escolhidos conforme a disponibilidade e a distância de transporte entre a fonte e o local da obra. Sendo assim, na maioria das situações, agregados com forma não tão desejável, como seixos rolados arredondados, são utilizados, já que o custo de aquisição de agregados mais adequados poderia inviabilizar as obras. Para isso, é essencial ter conhecimento das características de agregados e da sua correlação com o desempenho mecânico de misturas.

Nas misturas asfálticas, os agregados podem ser considerados como o esqueleto da mistura e desempenham um papel fundamental para a resistência às cargas atribuídas ao pavimento. Sendo assim, as propriedades dos agregados, como: dureza, textura superficial, angularidade, forma e distribuição granulométrica necessitam ser consideradas ainda na fase da dosagem, no intuito de obter misturas asfálticas mais resistentes. (ASPHALT INSTITUTE, 1989; MENDES et al., 2012).

2.5 Dosagem asfáltica

A dosagem de misturas asfálticas incide na escolha por meio de métodos empíricos de um teor ótimo de ligante, a partir de uma faixa granulométrica predefinida. O primeiro procedimento de dosagem registrado para misturas asfálticas é conhecido como método Hubbard-Field, o qual foi desenvolvido originalmente para dosagem de misturas de areia asfalto e depois alterado para aplicação em misturas com agregados graúdos (ARAO, 2016; ROBERTS et al., 2002).

De acordo com Hirsch (2007) o método Hubbard-Field baseava-se em determinar a carga máxima resistida por um corpo de prova (CP) quando forçado através de um orifício circular, o qual acarretava uma ruptura correspondente ao cisalhamento. Após o método Hubbard-Field, vários outros já foram formulados, porém para misturas asfálticas a quente os mais empregados foram os métodos de dosagem Hveem e Marshall (VASCONCELOS E SOARES, 2015).

O método Hveem foi desenvolvido pelo engenheiro da Califórnia Francis Hveem e consistia na quantificação do teor de ligante, a partir do ensaio de equivalente de querosene também desenvolvido pelo engenheiro, considerando a absorção e a rugosidade superficial do agregado. Contudo, o procedimento não garantia desempenho satisfatório frente à deformação permanente em trilha de rodas decorrente das repetições de solicitação de carga pelo tráfego (MOURA, 2010).

Motta et al. (1996) afirmam que o método Hveem possui duas vantagens reais: compactação pulsante, a qual viabiliza uma melhor simulação do adensamento que ocorre com o CAUQ em campo e o parâmetro de resistência, estabilidade Hveem, que é uma medida direta dos componentes de atrito interno da resistência de cisalhamento, medindo a capacidade de um corpo de prova resistir a deformação lateral quando uma carga vertical é aplicada.

As alterações na configuração de carregamento dos veículos comerciais, o aumento do volume de tráfego e as características de clima peculiares de cada região são fatores que motivam a evolução das metodologias de dosagem de misturas asfálticas. O método Marshall foi desenvolvido, na década de 30, por Bruce G. Marshall, com a finalidade de determinar a quantidade de ligante que deveria ser usada na composição de mistura betuminosa empregadas a serviços de pavimentação rodoviária (LEANDRO, 2016; SPECHT, 2004).

A maioria das misturas asfálticas a quente produzida nos Estados Unidos entre 1940 e 1990 foram dosadas utilizando a metodologia Marshall ou Hveem (Roberts et al., 1996). Entretanto, durante os anos 1980, inúmeras rodovias americanas com tráfego pesado apresentaram problemas precoces relacionados à deformação permanente. Esses incidentes foram atribuídos ao excesso de ligante nas misturas. Entendia-se que a compactação por impacto, durante o procedimento de dosagem, produzia corpos de prova com densidades diversas daquelas apresentadas pelas misturas em campo (ROBERTS et al., 2002).

Harman et al. (2002) declara que a partir daí foi desenvolvido o método Superpave que utiliza o Compactador Giratório Superpave, evidenciado na Figura 5, em função da sua facilidade de uso quando comparado a outros tipos de compactadores estudados no *Strategic Highway Research Program* (SHRP), que foi criado pelo *Federeal Highway Administration* (FHWA), em 1990, com uma sistemática de compactação giratória híbrida entre a compactação giratória do Texas (1930), o *Gyratory Test Machine* desenvolvido por John L. McRae do Corpo de Engenheiros do Exército Norte-Americano (1950) e a Prensa de Cisalhamento Giratória francesa.

Figura 5: Compactador Giratório Superpave (Matest)

Fonte: Acervo do autor (2019).

Na pesquisa SHRP várias mudanças foram realizadas, sendo proposta uma metodologia diferente que consiste basicamente em estimar um teor provável de

projeto através da fixação do volume de vazios e do conhecimento da granulometria dos agregados disponíveis. Ademais, o método também abrange o dimensionamento de misturas asfálticas ajustadas aos requisitos de desempenho ditadas pelo tráfego e ambiente (BOEIRA, 2011; VASCONCELOS E SOARES, 2015).

No decorrer da evolução dos procedimentos de dosagem, inúmeras formas de compactação de amostras vêm sendo desenvolvidas. Dependendo do método, as amostras podem ser quanto à forma, cilíndricas, trapezoidais, ou retangulares, e a compactação pode ser realizada por meio de impacto, amassamento, vibração ou rolagem (HARMAN et al., 2002).

Na dosagem de misturas asfálticas utilizar métodos diferentes de compactação geram resultados de teores de vazios distintos e consequentemente, implicam em teores de projeto de ligante diferentes. Entretanto, independente do tipo de compactação usada no procedimento de dosagem em laboratório, a compactação de campo será sempre a mesma, ou seja, executada por uma combinação de passagens de rolos pneumáticos e lisos. Dessa forma, misturas dosadas por metodologias diferentes, com as mesmas condições de tráfego e clima, poderão se comportar de maneira distinta no que diz respeito aos principais tipos de defeitos que ocorrem em pavimentos asfálticos (LEANDRO, 2016).

Moura (2010) afirma que além da energia de compactação, os ensaios físicos dos ligantes asfálticos e as especificações dos materiais, até então empregados para fins de sua caracterização na área de pavimentação, com os métodos Hveem e Marshall, eram limitados enfraquecendo a relação com o comportamento em campo.

Roberts et al. (1996) enumerou seis constatações que revelam a deficiência destas propriedades empíricas dos ligantes e a falta de relação direta com o desempenho de misturas asfálticas:

I. A penetração e a dutibilidade em ligantes asfálticos não se correlacionam diretamente com o desempenho de misturas asfálticas empregadas; algumas relações entre os valores obtidos nesses ensaios e o desempenho foram feitas com a experiência, entretanto com resultados relativamente incipientes;

II. Ensaios de penetração e viscosidade são conduzidos a temperaturas padrão, a 25ºC e a 60ºC, respectivamente, apesar das diferentes condições climáticas a que o pavimento é submetido;
III. A gama de temperaturas diferentes a que o pavimento é submetido não é contemplado no projeto de mistura, o que pode ser justificado com o fato da inexistência de um método de ensaio empírico que contemple a rigidez do ligante asfáltico à baixa temperatura para controle de trincamento térmico;
IV. Os ensaios empíricos julgam um curto período de misturação na produção e na aplicação da mistura asfáltica, simulados com a estufa filme delgado – thin film oven (TFO) ou a estufa de filme fino rotativo – rolling thin film oven test – (RTFOT). Contudo, longos períodos de misturação e de compactação não são considerados, sendo os mais prejudiciais ao desempenho das misturas asfálticas;
V. A classificação por penetração ou por viscosidade não atentam características de desempenho de misturas asfálticas. Além disso, existem ligantes asfálticos com mesmos valores de penetração e de viscosidade para a mesma granulometria, sendo que podem apresentar valores de desempenho distintos.
VI. As especificações dos ensaios de ligante asfáltico norteiam-se na experiência observacional dos técnicos rodoviários, sem uma especificação para ligantes asfálticos modificados por polímeros.

2.5.1 Método de dosagem Marshall

O método de dosagem Marshall foi elaborado no fim da década de 1930, no Estado do Mississipi realizado pelo WES (*Waterways Experiment Station*). O intuito era de determinar o teor de projeto a partir dos equipamentos disponíveis na época, onde a principal preocupação dos engenheiros era a deformação devido aos esforços de cisalhamento nas estruturas dos pavimentos (LEANDRO, 2016).

Moura (2010) destaca que inúmeros tipos de misturas asfálticas foram testados, alternando-se os esforços de compactação na tentativa de produzir densidades em laboratório semelhantes àquelas encontradas em campo de pistas-

teste. A compactação de laboratório envolveu variados tipos de soquete, variados tipos de combinação de números de golpes por face e/ou carga de compressão estática, variados tipos de sapatas dos soquetes em tamanho e forma, e diferentes moldes quanto à forma e materiais.

Originalmente, a compactação Marshall empregava um esforço de 25 golpes com o soquete Proctor, seguido de aplicação de uma carga estática de 5.000 libras (2.268kgf) por dois minutos com o propósito de nivelar a superfície do corpo de prova. Entretanto, após a análise de trechos experimentais, notou-se que o teor de ligante adotado com o uso do método Marshall era muito elevado, o que levava as seções construídas apresentar exsudação com o decorrer do tempo. Esse fato sinalizou que o esforço de compactação então empregado em laboratório era leve, não representando a compactação exercida em campo. Com base nisso, estudos foram realizados para apontar o esforço de compactação que levaria à escolha de um teor de ligante adequado (WHITE, 1985).

A metodologia de dosagem Marshall é a única normalizada no Brasil e trata-se de um procedimento empírico, através de compactação por impacto, norteado em parâmetros que melhor se aproximavam com o desempenho em pista, quanto ao afundamento em trilha de roda e ao trincamento de revestimentos asfálticos submetidos às solicitações de aeronaves do período. Devido ao fato de necessitar de aparatos simples, como o compactador Marshall, de baixo custo e demandar um menor tempo que outros métodos, o Marshall se difundiu rapidamente para a maioria dos Estados americanos e para outros países (ROBERTS et al., 2002).

Atualmente, a determinação do teor de projeto de misturas asfálticas no Brasil é conduzida com base na norma DNER-ME 43/95 (DNIT, 1995a) determina-se a faixa granulométrica em função da camada em que a mistura será utilizada. A partir da escolha do tipo de ligante são moldados de três a cinco grupos de três corpos de prova com diferentes teores de asfalto mediante aplicação de 75 golpes por face. Por fim obtêm-se amostras com 100 mm de diâmetro e, aproximadamente, 63,5 mm de altura (LEANDRO, 2016).

2.5.2 Propriedades volumétricas das misturas asfálticas

Os parâmetros volumétricos de uma mistura asfáltica compactada podem ser considerados um indicador do desempenho possível da mistura em campo. O comparativo entre os parâmetros volumétricos das misturas compactadas em campo e em laboratório tem sido fonte de estudo de vários pesquisadores ao longo dos anos. Entretanto, ainda não existe consenso em relação ao método de compactação que reproduza fielmente todos os parâmetros e propriedades medidas em amostras de campo (ASPHALT INSTITUTE, 2001).

Gouveia (2006) declara que os métodos mais habituais utilizados para dosar misturas asfálticas aliam critérios volumétricos, os quais são determinados a partir das proporções volumétricas dos materiais integrantes das misturas. No método de dosagem Marshall, o teor de asfalto de projeto é determinado em função das propriedades volumétricas:

- Volume de vazios (V_v): volume de ar (V_{ar}) presente entre as partículas do agregado envoltas pelo filme de asfalto, definido como uma porcentagem do volume total da mistura compactada. O V_v pode ser calculado através da equação:

$$V_V = \frac{DMT - G_{mb}}{DMT} \tag{2.1}$$

  Onde,
  DMT = Densidade Máxima Teórica da mistura; e
  G_{mb} = Densidade Aparente da mistura.

- Vazios do agregado mineral (VAM): soma do volume de vazios e do volume de asfalto efetivo, expresso como uma porcentagem do volume total da mistura compactada, representada pela expressão:

$$VAM = (V_v + VCB)\ X\ 100 \tag{2.2}$$

  Onde,
  V_V = Volume de vazios; e

VCB = Vazios cheio de betume.

- Relação betume-vazios (RBV): é o grau de preenchimento do VAM por asfalto, apresentado em porcentagem, representado pela equação:

$$RBV = \frac{VCB}{VAM}\ X\ 100 \tag{2.3}$$

Onde,

VCB = Vazios cheio de betume; e

VAM = Vazios do agregado mineral.

2.5.3 Seleção granulométrica

A seleção de uma granulometria inadequada é um dos fatores que contribui para o desenvolvimento precoce de deformação permanente e que também interfere diretamente na segurança do usuário, pois pode gerar acúmulo d'água, aquaplanagem, atrito e impasses para manobrar o veículo. Na seleção das granulometrias, os critérios técnicos determinam faixas que devem ser obedecidos pelos percentuais passantes em cada peneira, podendo ser adotado uma metodologia tanto em nível nacional, como as faixas do DNIT, quanto internacional (FERREIRA et al., 2016).

Ferreira et al. (2015) revela que no Brasil, o projeto e a execução de uma mistura asfáltica densa necessitam estar conforme a especificação de serviço DNIT-ES 031/2006, a qual propõe: três faixas granulométricas (A, B e C), as peneiras a serem empregadas no projeto, os valores percentuais passantes em cada peneira e as tolerâncias envolvidas, sendo evidenciada na **Tabela 1**. Além disso, a escolha de uma granulometria apropriada incidirá de forma positiva no desempenho da estrutura e nos gastos relacionados com manutenção e recuperação.

Tabela 1: Faixas granulométricas - DNIT

Peneira de malha quadrada		% em massa, passando			
Série ASTM	**Abertura (mm)**	**A**	**B**	**C**	**Tolerâncias**
2”	50,8	100	-	-	-
1 ½”	38,1	95 - 100	100	-	± 7%
1”	25,4	75 - 100	95 - 100	-	± 7%
¾”	19,1	60 - 90	80 - 100	100	± 7%
½”	12,7	-	-	80 - 100	± 7%
3/8”	9,5	35 - 65	45 - 80	70 - 90	± 7%
N° 4	4,8	25 - 50	28 - 60	44 - 72	± 5%
N° 10	2,0	20 - 40	20 - 45	22 - 50	± 5%
N° 40	0,42	10 - 30	10 - 32	8 - 26	± 5%
N° 80	0,18	5 - 20	8 - 20	4 - 16	± 3%
N° 200	0,075	1 - 8	3 - 8	2 - 10	± 2%
Asfalto solúvel no CS2(+) (%)		4,0 - 7,0 Camada de ligação (Binder)	4,5 - 7,5 Camada de ligação e rolamento	4,5 - 9,0 Camada de rolamento	± 0,3%

Fonte: Adaptado de DNIT, 2006c.

2.6 Pavimentação e agregados reciclados

A carência de jazidas naturais (solos e agregados) cujas características obedecem às especificações técnicas tradicionais para o uso em pavimentação, associada a uma legislação ambiental mais rigorosa quanto à concessão de licenças para a exploração de jazidas naturais são fatores encorajadores para a busca e emprego de materiais reciclados ou alternativos (BATALIONE, 2007). Outro ponto que também contribui para a procura de agregados reciclados é o desenvolvimento sustentável, de modo a suprir as necessidades existentes hoje, sem comprometer a capacidade de atender as necessidades das futuras gerações.

Ademais, com o passar dos anos, o aumento do volume de tráfego nas estradas implicou na necessidade de pavimentos mais resistentes. Consequentemente, foi preciso procurar métodos que melhorassem a qualidade dos revestimentos, sendo a mistura asfáltica incorporada com agregados alternativos um exemplo, no qual não só propicia uma melhora na qualidade, quanto reduz os custos de construção e manutenção (SPECHT, 2004).

Leite (1999) revela que o acréscimo de polímeros aos ligantes asfálticos convencionais, proporcionou uma maior coesão do ligante e aderência aos agregados, maior resistência ao envelhecimento e a minimização da susceptibilidade térmica. O polímero modifica positivamente o comportamento elástico do asfalto e colabora para o aumento da sua resistência à deformação permanente e às trincas por fadiga, melhorando também a resistência à oxidação (BRINGEL et al., 2005).

No Brasil, a forma mais habitual de modificação da mistura asfáltica é por meio da inserção de borracha reciclada de pneus, a qual promove uma melhoria nas características de resistência a fadiga e ao trincamento térmico, devido à menor sensibilidade a variações de temperatura (SPECHT, 2004). Os polímeros originados de borrachas de pneus triturados podem ser acrescidos por via seca ou por via úmida. Pelo processo de via seca, a borracha triturada é incorporada aos agregados, já por via úmida a borracha é adicionada ao ligante asfáltico, na maior parte das vezes essa mudança ocorre em usina, onde o ligante é produzido (ROSA et al., 2012).

Glover (2007) aborda que o concreto asfáltico modificado pode obter algumas melhorias, como uma menor rigidez ou viscosidade às altas temperaturas associadas à construção, facilitando bombeamento do aglutinante de asfalto líquido, bem como a mistura e compactação da mistura usinada à quente e uma maior adesão entre o asfalto e o agregado na presença de umidade. Os polímeros mais comuns empregados em misturas asfálticas são:

- Estireno-Butadieno-Estireno (SBS);
- Polietileno (PE);
- Borracha de Estireno Butadieno (SBR);
- Polibutadieno (PB);
- Etileno Acetato de Vinila (EVA);
- Etileno Acrilato de Metila (EMA);
- Polipropileno (PP); e
- Epóxis e uretanos, borracha de pneus.

2.6.1 Polietileno de alta densidade (PEAD)

O polietileno (PE) é o plástico mais popular do mundo, justificado por suas diversas propriedades, como: excelente resistência química, boa fadiga e resistência ao desgaste, alta resistência a solventes orgânicos e baixa taxas de absorção de umidade (AWWAD E SHBEEB, 2007). Candian (2007) afirma que entre os polímeros existentes no mercado, o polietileno detém uma das estruturas mais simples e comercialmente são encontrados quatro tipos, os quais costumam ser classificados por meio da densidade:

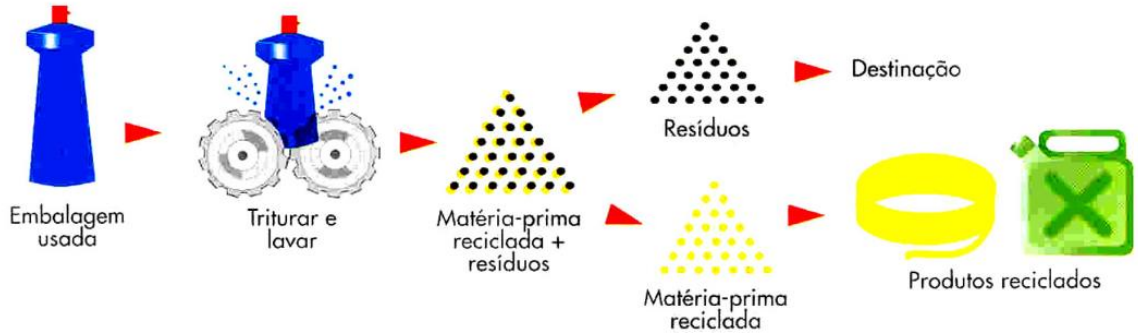
- Polietileno de baixa densidade (PEBD): entre 0,910 a 0,925 g/cm³;
- Polietileno linear de baixa densidade (PELBD): entre 0,910 a 0,925 g/cm³;
- Polietileno de média densidade (PEMD): entre 0,926 a 0,940 g/cm³; e
- Polietileno de alta densidade (PEAD): acima 0,941 g/cm³.

Hoje em dia, boa parte dos resíduos descartados no Brasil é composta por material plástico. Dentre os polímeros de maior volume encontra-se o polietileno de alta densidade, muito frequente no lixo doméstico, no qual o aumento do seu uso e consequentemente o aumento da produção desse resíduo, implicou-se no acúmulo significante desse material em lixões e/ou aterros sanitários. O PEAD é um polímero de cadeia linear não ramificada, que possui resistência química e térmica superiores aos polietilenos de baixas densidades, alta capacidade elástica e flexibilidade (MANO et al., 2005; QUINTANA et al., 2007).

Cruz et al. (2008) salienta que a crescente aplicação do polietileno de alta densidade, principalmente no setor de embalagens de rápido descarte, contribui para que se torne um dos plásticos mais consumidos no mercado mundial. Embora o PEAD esteja sendo vastamente usado em aplicações como pavimentação (reciclado misturado com asfalto), madeira plástica, construção civil, plasticultura (lonas), embalagens flexíveis, indústria automobilística, entre outros.

No intuito de minimizar o impacto gerado pelo uso intenso de materiais poliméricos pela sociedade, Ozório et al. (2015) reconhece a reciclagem como uma alternativa. Contudo, por motivos culturais, ainda há resistência dos seres humanos em integrar a reciclagem em seu cotidiano. A Figura 6 ilustra o processo simplificado da reciclagem de materiais plásticos como o polietileno de alta densidade.

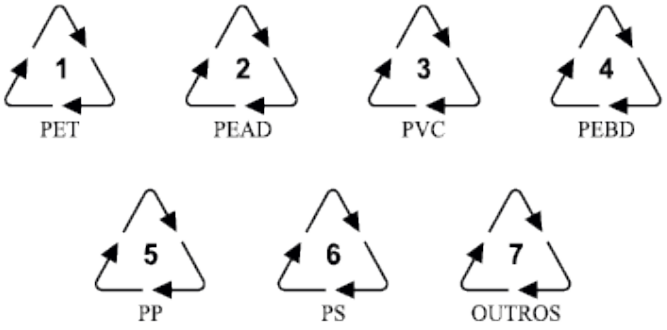
Figura 6: Processo simplificado da reciclagem de polímeros



Fonte: Ozório et al., 2015.

Para facilitar a identificação do material plástico que constitui um produto, existe um código, normalmente com um número de 1 a 7, dentro de um triângulo de três setas, como apresentado na Figura 7. Constantemente esse código é acrescido na base do frasco ou no verso da embalagem e possui o objetivo de facilitar a recuperação dos recipientes plásticos descartados com o resíduo sólido urbano, sendo o código do PEAD, representado pelo número 2 (COLTRO E DUARTE, 2013).

Figura 7: Simbologia dos códigos de identificação de materiais plásticos



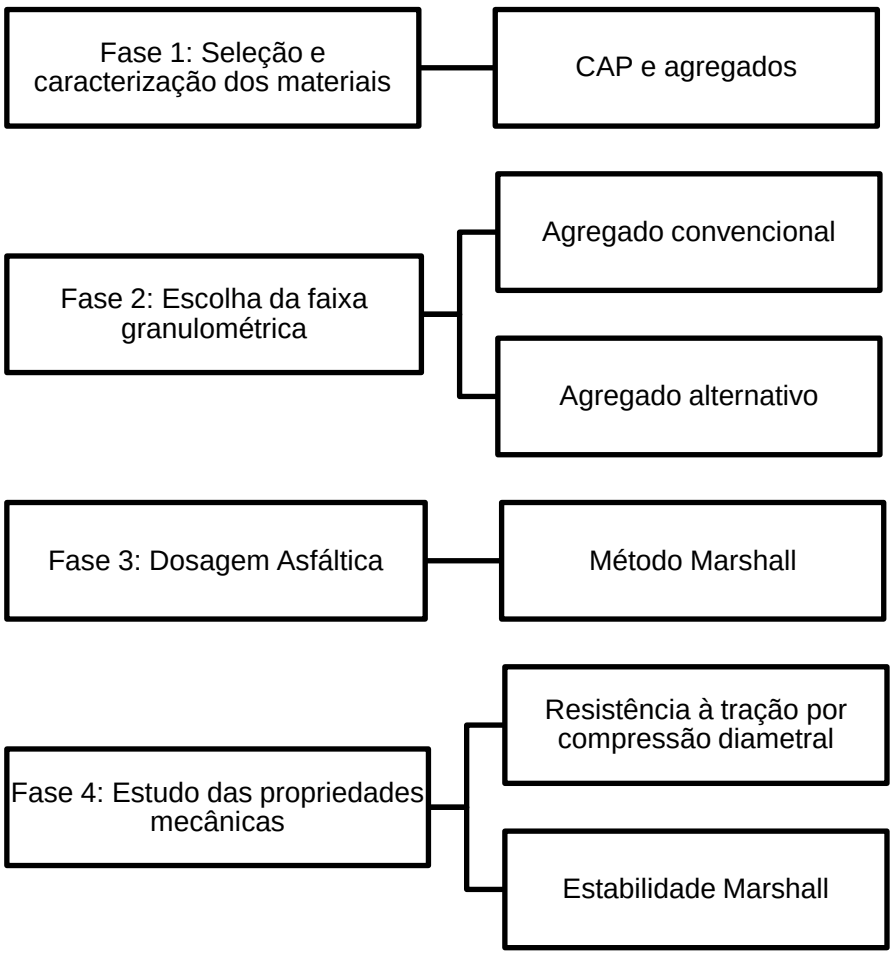
1 - Politereftalato de etileno
2 - Polietileno de alta densidade
3 - Policloreto de vinila
4 - Polietileno de baixa densidade
5 - Polipropileno
6 - Poliestireno
7 - Outros

Fonte: ABNT, 2008.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa se deu em quatro fases citadas no esquema da Figura 8, onde a fase 1 consistiu em selecionar e caracterizar os materiais utilizado no estudo, a fase 2 em escolher a faixa granulométrica, a fase 3 em dosar a mistura asfáltica e por fim, a fase 4 em compreender as propriedades mecânicas, visando estudar a viabilidade emprego de resíduos de polietileno de alta densidade em misturas asfálticas.

Figura 8: Fases da pesquisa



Fonte: Acervo do autor (2019).

3.1 Fase 1: Seleção e caracterização dos materiais

No intuito de estudar a possibilidade de incorporação do PEAD nas misturas asfálticas, foram utilizados como materiais: agregados minerais e alternativo (PEAD), cal hidratada e cimento asfáltico de petróleo (CAP 30/45), conforme retrata a **Tabela 2**.

Tabela 2: Materiais utilizados

Tipo	Procedência	Natureza
Brita 0	Martins Lanna	Gnaisse
Pó de Pedra	Martins Lanna	Gnaisse
Cal hidratada	-	CH-III (Dolomítica)
PEAD	Reciclagem BH	Reciclado
CAP	REGAP	30/45

Fonte: Acervo do autor (2019).

3.1.1 Agregados

Para a utilização em revestimentos asfálticos, a seleção de agregados depende de sua disponibilidade, custo e qualidade, bem como do tipo de aplicação (BERNUCCI, 2006). A composição do esqueleto das misturas asfálticas dosadas contaram com agregados minerais do tipo: brita 0 e pó de pedra, evidenciados na Figura 9 e Figura 10, respectivamente, provenientes da Pedreira Martins Lanna, situada na Fazenda Rancho Novo, em Contagem-MG.

Figura 9: Brita 0

Fonte: Acervo do autor (2019).

Figura 10: Pó de pedra

Fonte: Acervo do autor (2019).

Já como agregado alternativo, foi usado o polietileno de alta densidade do tipo reciclado, colorido e triturado, proveniente da recicladora Reciclagem BH, localizada no bairro Madre Gertrudes, em Belo Horizonte-MG, ilustrado na Figura 11.

Figura 11: PEAD reciclado

Fonte: Acervo do autor (2019).

E, como material de enchimento utilizou-se a cal hidratada do tipo dolomítica, retratada na Figura 12, oriunda da empresa Calfix.

Figura 12: Cal hidratada

Fonte: Acervo do autor (2019).

Para garantir a qualidade dos agregados a serem empregados na mistura asfáltica, procedeu-se a caracterização dos materiais em laboratório. Para esse fim, realizou-se os seguintes ensaios: análise granulométrica e massa específica.

Efetuou-se a análise granulométrica da brita 0, pó de pedra, cal e PEAD, pelo método do peneiramento, com base na norma do DNIT-ME 083/98, respeitando as quantidades mínimas de amostra evidenciadas na **Tabela 3**. O ensaio consiste em peneirar de forma mecânica ou manual o material seco em estufa (110±5) ºC em uma série de peneiras predefinidas durante um intervalo de tempo, até que não mais que 1% da massa total da amostra não passe em qualquer peneira. Em seguida, pesou-se e calculou-se a porcentagem do material retido em cada peneira sobre a massa total (DNIT, 1998b).

Tabela 3: Massa mínima por amostra de ensaio - análise granulométrica

Dimensão máxima característica do agregado (mm)	Massa mínima da amostra de ensaio (kg)
Agregados miúdos	
4,8	1
Agregados graúdos	
9,5	5
19	7
25	10
38	15
50	20

Fonte: Adaptado de DNIT, 1998b.

Räder (2018) afirma que a densidade específica ou massa específica é o valor correspondente à relação entre quantidade, ou seja, a massa de um certo material, e seu respectivo volume, sendo comumente indica em t/m³, kg/dm³ ou g/cm³. Para obtenção das massas específicas dos agregados, utilizou-se uma determinada metodologia para cada tipo:

- Brita 0 – norma DNER-ME 081/98 - Agregados - determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. O ensaio é realizado com a amostra lavada e seca do material retido na peneira 4,8 mm, após ter sido imergido em água por (24±4) h, o qual se fundamenta na pesagem do agregado na condição saturada superfície (Ph), do

material imerso em água potável (Pi) e do material seco em estufa (Ps). A densidade específica aparente pode ser calculada através da seguinte equação (DNIT, 1998a):

$$Dap = \frac{Ms}{Mh - Mi} \tag{3.1}$$

Onde,

Dap = Densidade específica aparente, em kg/dm³ ou em g/cm³;
Ms = massa do agregado seco, em kg ou g;
Mh = massa do agregado na condição saturada superfície seca, em kg ou em g;
Mi = leitura correspondente ao agregado imerso em água, em kg ou g.

- Pó de pedra – norma DNER-ME 084/95 - Agregado miúdo – determinação da densidade real. O método é realizado com uma amostra seca em estufa a (105 a 110) ºC de aproximadamente 1000g, o qual toma-se cerca de 500g do material retido nas peneiras 4,8 mm e 0,075 mm para ensaiar. Em sequência, realiza-se a pesagem do picnômetro vazio e seco, massa do picnômetro mais amostra, massa mais amostra com água e massa do picnômetro cheio de água. Após esses passos, a densidade real do agregado miúdo é calculada pela fórmula (DNIT, 1995b):

$$D_{25} = \frac{b - a}{(d - a) - (c - b)} \tag{3.2}$$

Onde,

D25 = densidade real do agregado miúdo a 25/25°C;
a = massa do picnômetro vazio e seco, em g;

b = massa do picnômetro mais amostra, em g;

c = massa do picnômetro mais amostra mais água, em g;

d = massa do picnômetro cheio de água, em g.

Entretanto, para a cal hidratada obteve-se a massa específica pelo boletim técnico do próprio fornecedor e para o PEAD reciclado foi adotado um valor de 0,97 g/cm³, conforme estudos realizados por Moghadas Nejad et al. (2013).

3.1.2 Ligante asfáltico

O ligante asfáltico utilizado no estudo foi do tipo cimento asfáltico de petróleo, com classificação CAP 30/45, ilustrado na Figura 13, proveniente da Refinaria Gabriel Passos – REGAP, localizada em Betim-MG, a qual também disponibilizou um certificado de ensaio, evidenciado na Tabela 4. A norma DNIT 095/2006 - Cimentos asfálticos de petróleo - Especificação de material (DNIT, 2006b) define que cimento asfáltico de petróleo é o asfalto gerado particularmente para oferecer as qualidades e consistências próprias para aplicação direta na construção de pavimentos.

Figura 13: Cimento asfáltico de petróleo - CAP 30/45

Fonte: Acervo do autor (2019).

Tabela 4: Caracterização do ligante asfáltico

CARACTERÍSTICA	MÉTODO	ESPECIFICAÇÃO	RESULTADO	UND
PENETRAÇÃO	D 5	30 a 45	30	0,1 mm
PONTO DE AMOLECIMENTO	D 36	52 mín	53,8	°C
VISCOSIDADE BROOKFIELD 135°C-SP21 20RPM	D 4402	374 mín	454	cp
VISCOSIDADE BROOKFIELD 150°C-SP21	D 4402	203 mín	223	cp
VISCOSIDADE BROOKFIELD 177°C-SP21	D 4402	76 a 285	81	cp
RTFOT PENETRAÇÃO RETIDA	D 5	60 mín	77	%
RTFOT - AUMENTO DO PONTO DE AMOLECIMENTO	D 36	8 máx	4,4	°C
RTFOT - DUCTILIDADE A 25°C	D 113	10 mín	>150	cm
RTFOT VARIAÇÃO EM % MASSA	D 2872	-0,5 a 0,5	-0,014	%
DUCTILIDADE A 25°C	D 113	60 mín	>150	cm
SOLUBILIDADE NO TRICLOROETILENO	D 2042	99,5 mín	99,9	% massa
PONTO DE FULGOR	D 92	235 mín	326	°C
ÍNDICE DE SUSCETIBILIDADE TÉRMICA	X 018	-1,5 a 0,7	-1,4	-
DENSIDADE RELATIVA	D 70	-	1,007	g/cm³

Fonte: Acervo do autor (2019).

3.2 Fase 2: Escolha da faixa granulométrica

Após a análise granulométrica dos materiais, realizou-se o enquadramento granulométrico pelo método convencional, baseado no processo de tentativas e erros, respeitando as especificações técnicas da Faixa C do DNIT, evidenciada na **Tabela 5**, no qual resultou-se em duas composições, um traço com apenas agregados convencionais (traço A) e outro acrescido de PEAD (traço B).

Tabela 5: Faixa C - DNIT

Peneira de malha quadrada		% em massa, passando	
Série ASTM	Abertura (mm)	C	Tolerâncias
2”	50,8	-	-
1 ½”	38,1	-	± 7%
1”	25,4	-	± 7%
¾”	19,1	100	± 7%
½”	12,7	80 - 100	± 7%
3/8”	9,5	70 - 90	± 7%
N° 4	4,8	44 - 72	± 5%
N° 10	2	22 - 50	± 5%
N° 40	0,42	8 - 26	± 5%
N° 80	0,18	4 - 16	± 3%
N° 200	0,075	2 - 10	± 2%

Fonte: Adaptado de DNIT, 2006c.

3.3 Fase 3: Dosagem asfáltica

Além da utilização de materiais adequados, com melhores propriedades físicas, como forma, textura superficial e angularidade adequadas, é preciso um método de dosagem granulométrica que garanta uma estrutura adequada e que permita, simultaneamente, um teor de ligante suficiente para uma boa durabilidade (VAVRIK et al., 2001 e CUNHA, 2004). Para o desenvolvimento do projeto, foram dosados dois tipos a mistura asfáltica pelo método Marshall - DNER-ME 043/95, uma convencional representada pelo “traço A” e outra pelo “traço B”, no qual foi acrescentado resíduo de PEAD por via seca.

O método baseia-se nos seguintes passos (BERNUCCI et al., 2008; DNIT, 1995a):

1. Definição das massas específicas reais do CAP e dos agregados;
2. Seleção da faixa granulométrica;
3. Determinação da composição dos agregados, de modo a enquadrar nos limites da faixa granulométrica (Faixa C do DNIT);
4. Escolha das temperaturas de mistura e de compactação, a partir da curva viscosidade-temperatura do ligante, no qual foi utilizado (153,1 a 159,9) ºC e (143,4 a 153,1) ºC, respectivamente;
5. Definição de teores de asfalto para os diferentes grupos de corpos de prova (CPs) a serem moldados, sendo no mínimo 3 CPs por teor (4,00%, 4,50% e 5,00%);
6. Pesagem dos agregados e o ligante de modo a obter CPs com cerca de 1200g cada;
7. Aquecer os materiais conforme os limites estabelecidos no item 4, misturá-los, como evidencia a Figura 14, e moldá-los com auxílio do compactador Marshall, aplicando 75 golpes de cada lado do CP;
8. Após o resfriamento e a desmoldagem dos corpos de prova, foram medidos o diâmetro e a altura de cada um e obteve-se as massas seca e submersa em água, no intuito de determinar os parâmetros volumétricos da mistura, G_{mb} e DMT; e

Figura 14: Preparo da mistura asfáltica pelo método Marshall

Fonte: Acervo do autor (2019).

9. Por fim, os CPs foram submersos em banho-maria a 60°C por um período de 30 a 40 minutos, como ilustra a Figura 15. Em seguida, os CPs foram submetidos a prensa Marshall para determinar a estabilidade em Newton (N), tendo as dimensões obteve-se a carga máxima cujo corpo de prova suporta antes da ruptura.

Figura 15: Corpos de prova em Banho Maria

Fonte: Acervo do autor (2019).

3.4 Fase 4: Estudo das propriedades mecânicas

Com o intuito de comparar e avaliar o desempenho mecânico das duas misturas asfálticas distintas, realizou-se o ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral, normatizado no Brasil (DNIT-ME 136/2018) e o ensaio de Estabilidade Marshall.

3.4.1 Resistência à tração por compressão diametral

Pinto e Preussler (2001) abordam que o ensaio de compressão diametral ou tração por compressão diametral foi criado pelo professor Fernando Luiz Lobo B. Carneiro do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, no Rio de Janeiro, para obtenção da resistência à tração (RT) de corpos de prova de argamassa. Desse modo o ensaio ficou conhecido no exterior como “ensaio brasileiro”, adiante o investigador Schmidt da Chevron, Califórnia, empregou esse ensaio para misturas betuminosas sob carregamento repetido.

Esse ensaio tornou-se popular tanto pela facilidade e rapidez de execução, quanto pelo fato de usar o mesmo tipo de corpo de prova cilíndrico e equipamentos para a determinação da resistência à compressão do concreto-cimento. O procedimento baseia-se no emprego de duas forças concentradas e diametralmente inversas de compressão em um cilindro, o que gera no decorrer do diâmetro solicitado, tensões de tração uniformes perpendiculares a este diâmetro (FALCÃO E SOARES, 2002).

Segundo a norma DNIT-ME 136/2010 (DNIT, 2010) o CP reservado ao ensaio pode ser originado diretamente na pista por extração ou moldado em laboratório pelo método de Dosagem Marshall, de modo que seja cilíndrico e possua altura entre 3,50 cm e 6,50 cm e diâmetro de 9,80 cm a 10,20 cm. A execução do ensaio consiste nos seguintes passos:

1. Medir a altura (h) e diâmetro (d) de cada corpo de prova com paquímetro, em quatro e três posições distintas, respectivamente, como ilustra a Figura 16. Adotar como altura e diâmetro o valor da média aritmética das leituras;

Figura 16: Obtenção da altura (h) e diâmetro (d) do CP para o ensaio de RT

Fonte: Acervo do autor (2019).

2. Submeter o CP na estufa ou sistema de refrigeração, por um período de 2 horas, de forma a alcançar uma temperatura específica de (25±0,1) ºC. Após esse tempo, colocar o corpo de prova com sua superfície cilíndrica entre dois frisos metálicos, curvos em uma das faces, com comprimento análogo ao do CP. Acertar os pratos da prensa até que seja alcançada uma leve compressão, apropriada para manter a posição do corpo de prova, evidenciado na Figura 17;

Figura 17: Prensa para ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Fonte: Acervo do autor (2019).

3. Impor a carga progressivamente, com uma velocidade de deformação de 0,8±0,1 mm/s, até que se dê a ruptura; e
4. Registrar o valor da carga de ruptura (F).
5. Definir a Resistência à tração através da fórmula:

$$\sigma_R = \frac{2F}{100\pi dh} \tag{3.3}$$

Onde,

R = resistência à tração, em MPa;
F = carga de ruptura, em N;
d = diâmetro de corpo de prova, em cm; e
h = altura do corpo de prova, em cm.

3.4.2 Estabilidade Marshall

Bernucci et al. (2008) determina estabilidade como a maior carga que o corpo de prova aguenta antes da sua ruptura. O ensaio de estabilidade Marshall é regido pela norma DNER-ME 043/95. Para a realização desse ensaio é necessário (DNIT, 1995a):

1. Definir a espessura de cada corpo de prova, com auxílio de um paquímetro;
2. Imergir os corpos de prova em banho-maria a (60±1) ºC por cerca de 30 a 40 minutos;
3. Posteriormente, colocar cada CP no molde de compressão, posicioná-los na prensa Marshall e executar o equipamento de forma que seu êmbolo se desloque a uma velocidade de 5 centímetros por minuto, até o rompimento do corpo de prova, sendo a estabilidade representada pela leitura do valor de carga máxima aplicado; e
4. Por fim, realizar a correção do valor da estabilidade conforme a espessura de cada CP, definida pela multiplicação do valor lido no item 3 e o fator de correção, que pode ser obtido na **Tabela 6** ou pela fórmula 3.4:

$$f = 927{,}23h^{-1{,}64} \quad (3.4)$$

Onde,

f = fator de correção; e

h = espessura do corpo de prova.

Tabela 6: Fator de correção - Estabilidade Marshall

Espessura (mm)	Fator	Espessura (mm)	Fator	Espessura (mm)	Fator
50,8	1,47	56,3	1,22	64,3	0,98
51	1,45	56,6	1,21	64,7	0,97
51,2	1,44	56,8	1,2	65,1	0,96
51,6	1,43	57,12	1,19	65,6	0,95
51,8	1,42	57,4	1,18	66,1	0,94
52	1,41	57,7	1,17	66,7	0,93
52,2	1,4	58,1	1,16	67,1	0,92
52,4	1,39	58,4	1,15	67,5	0,91
52,6	1,38	58,7	1,14	67,9	0,9
52,9	1,37	59	1,13	68,3	0,89
53,1	1,36	59,3	1,12	68,8	0,88
53,3	1,35	59,7	1,11	69,3	0,87
53,5	1,34	60	1,1	69,9	0,86
53,8	1,33	60,3	1,09	70,3	0,85
54	1,32	60,6	1,08	70,8	0,84
54,2	1,31	60,9	1,07	71,4	0,83
54,5	1,3	61,1	1,06	72,2	0,82
54,7	1,29	61,4	1,05	73	0,81
54,9	1,28	61,9	1,04	73,5	0,8
55,1	1,27	62,3	1,03	74	0,79
55,4	1,26	62,7	1,02	74,6	0,78
55,6	1,25	63,1	1,01	75,4	0,77
55,8	1,24	63,5	1	76,2	0,76
56,1	1,23	63,9	0,99		

Fonte: Adaptado de DNIT, (1995a).

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O presente capítulo aborda e discute os resultados obtidos a partir da execução das quatro fases propostas neste estudo: seleção e caracterização dos materiais (agregados e ligante), escolha da faixa granulométrica pelas especificações técnicas do DNIT, dosagem asfáltica pelo método Marshall e o estudo das propriedades mecânicas por meio do ensaio de resistência à tração por compressão diametral e estabilidade Marshall.

4.1 Fase 1: Seleção e caracterização dos materiais

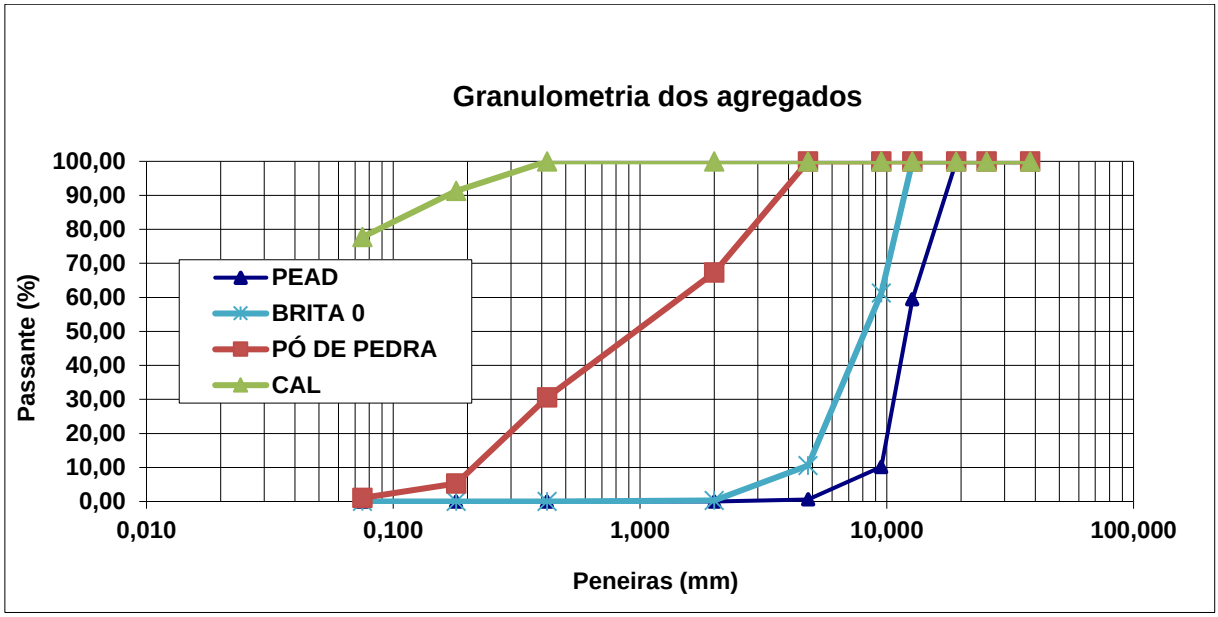
Após a seleção dos agregados realizou-se a caracterização dos constituintes da mistura asfáltica por meio da análise granulométrica por peneiramento, definida pela norma do DNIT-ME 083/98 discutida anteriormente. Na **Tabela 7**, observa-se o percentual passante de cada material, no qual os agregados convencionais, brita 0, pó de pedra e cal, apresentaram 100% dos grãos passantes na peneira de ½", em contrapartida o agregado alternativo, polietileno de alta densidade (PEAD), obteve apenas 59,1% passante. Já de forma ilustrativa, também é possível visualizar no Gráfico 1 os resultados obtidos pelo peneiramento.

Tabela 7: Resultado granulométrico dos agregados

GRANULOMETRIA					
PENEIRA		**% PASSANTE**			
(pol.)	**(mm)**	**BRITA 0**	**PÓ DE PEDRA**	**CAL**	**PEAD**
1 1/2"	**38,1**	100,00	100,00	100,00	100,00
1"	**25,4**	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	**19,1**	100,00	100,00	100,00	100,00
1/2"	**12,7**	100,00	100,00	100,00	59,41
3/8"	**9,5**	61,26	100,00	100,00	10,18
n.º 4	**4,8**	10,59	100,00	100,00	0,61
n.º 10	**2**	0,32	67,30	100,00	0,00
n.º 40	**0,42**	0,00	30,65	100,00	0,00
n.º 80	**0,18**	0,00	5,27	91,29	0,00
n.º 200	**0,075**	0,00	1,05	77,73	0,00

Fonte: Acervo do autor (2019).

Gráfico 1: Resultado granulométrico dos agregados



Fonte: Acervo do autor (2019).

A Tabela 8 revela as massas específicas reais dos materiais que integram as misturas asfálticas dosadas nesta pesquisa. Conforme já foi supracitado, para a brita 0 e o pó de pedra, com densidades iguais a 2,673 e 2,665 g/cm³, respectivamente, os resultados foram definidos através dos ensaios realizados em laboratório. Entretanto, para a cal hidratada (2,254 g/cm³) e o CAP 30/45 (1,007 g/cm³) foram adotados os valores informados pelos fornecedores e para o PEAD (0,970 g/cm³) atribuído o valor utilizado no estudo de Moghadas Nejad et al. (2013).

Tabela 8: Massa específica dos materiais

Material	Massa específica (g/cm³)
Brita 0	2,673
Pó de Pedra	2,665
Cal hidratada	2,254
PEAD reciclado	0,970
CAP 30/45	1,007

Fonte: Acervo do autor (2019).

4.2 Fase 2: Escolha da faixa granulométrica

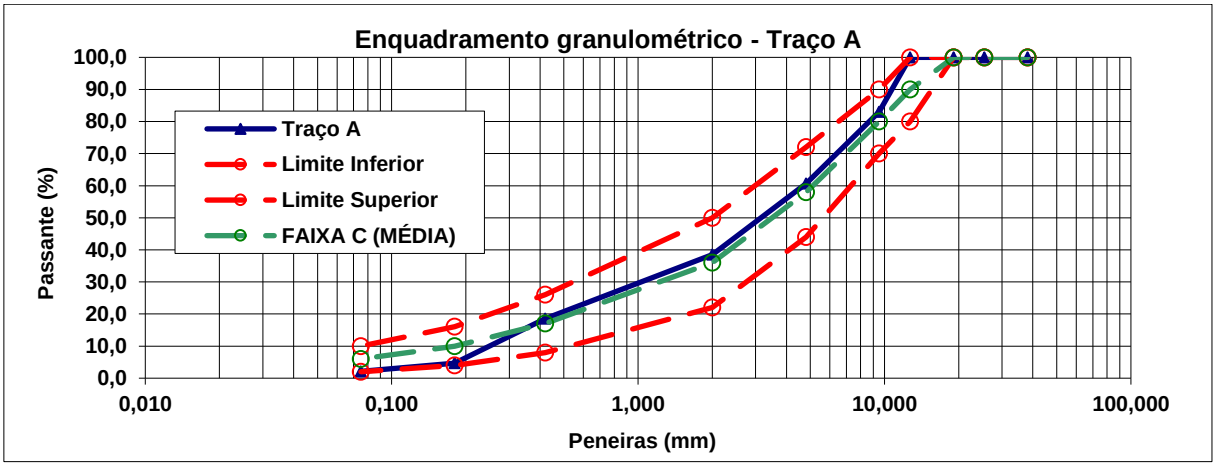
Após a seleção e caracterização dos materiais, realizou-se a escolha da faixa granulométrica obedecendo os limites da Faixa C do DNIT, resultando em duas composições, traço A e traço B. O traço A foi estabelecido apenas com agregados convencionais como apresentado na Tabela 9 e ilustrado no Gráfico 2, sendo empregado 44,00% de brita 0, 54,00% de pó de pedra e 2,0% de cal, como material de enchimento.

Tabela 9: Composição granulométrica - Traço A

PENEIRA		% PASSANTE						CURVA
		BRITA 0		PÓ DE PEDRA		CAL		
(pol.)	(mm)	AMOSTRA TOTAL	TENTATIVA 44,00%	AMOSTRA TOTAL	TENTATIVA 54,00%	AMOSTRA TOTAL	TENTATIVA 2,00%	
1 1/2"	**38,1**	100,00	44,00	100,00	54,00	100,00	2,00	**100,00**
1"	**25,4**	100,00	44,00	100,00	54,00	100,00	2,00	**100,00**
3/4"	**19,1**	100,00	44,00	100,00	54,00	100,00	2,00	**100,00**
1/2"	**12,7**	100,00	44,00	100,00	54,00	100,00	2,00	**100,00**
3/8"	**9,5**	61,26	26,95	100,00	54,00	100,00	2,00	**82,95**
n.º 4	**4,8**	10,59	4,66	100,00	54,00	100,00	2,00	**60,66**
n.º 10	**2**	0,32	0,14	67,30	36,34	100,00	2,00	**38,48**
n.º 40	**0,42**	0,00	0,00	30,65	16,55	100,00	2,00	**18,55**
n.º 80	**0,18**	0,00	0,00	5,27	2,85	91,29	1,83	**4,67**
n.º 200	**0,075**	0,00	0,00	1,05	0,57	77,73	1,55	**2,12**

Fonte: Acervo do autor (2019).

Gráfico 2: Enquadramento granulométrico - Traço A



Fonte: Acervo do autor (2019).

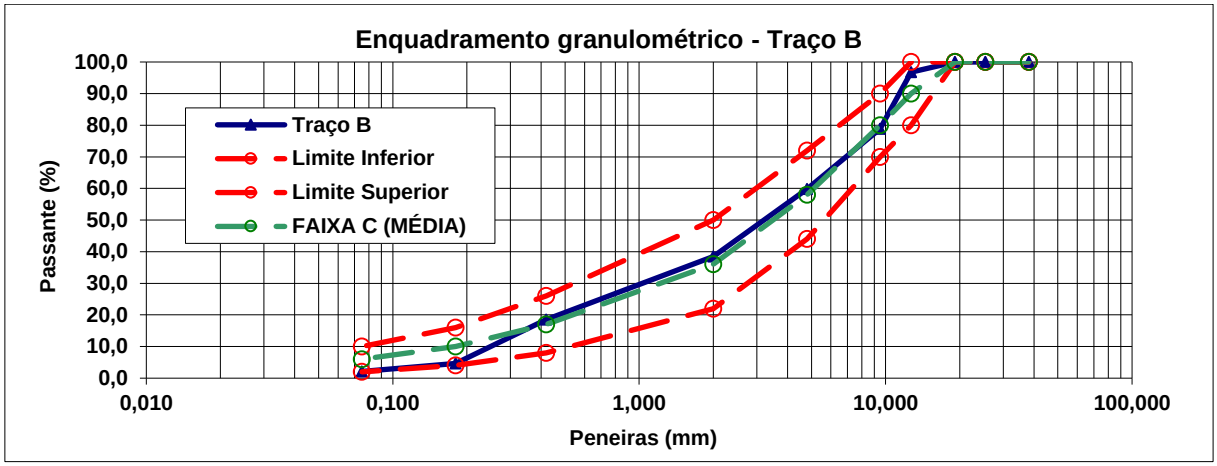
Como apresentado na Tabela 10 e ilustrado no Gráfico 3, o traço B representa uma composição granulométrica formada com os mesmos materiais convencionais do traço A, acrescido do agregado alternativo de polietileno de alta densidade, reciclado e triturado. O traço B é composto por 8,00% de PEAD, 36,00% de brita 0, 54,00% de pó de pedra e 2,00% de cal.

Tabela 10: Composição granulométrica - Traço B

PENEIRA		% PASSANTE								CURVA
		PEAD		BRITA 0		PÓ DE PEDRA		CAL		
(pol.)	(mm)	AMOSTRA TOTAL	TENTATIVA 8,00%	AMOSTRA TOTAL	TENTATIVA 36,00%	AMOSTRA TOTAL	TENTATIVA 54,00%	AMOSTRA TOTAL	TENTATIVA 2,00%	
1 1/2"	**38,1**	100,00	8,00	100,00	36,00	100,00	54,00	100,00	2,00	**100,00**
1"	**25,4**	100,00	8,00	100,00	36,00	100,00	54,00	100,00	2,00	**100,00**
3/4"	**19,1**	100,00	8,00	100,00	36,00	100,00	54,00	100,00	2,00	**100,00**
1/2"	**12,7**	59,41	4,75	100,00	36,00	100,00	54,00	100,00	2,00	**96,75**
3/8"	**9,5**	10,18	0,81	61,26	22,05	100,00	54,00	100,00	2,00	**78,87**
n.º 4	**4,8**	0,61	0,05	10,59	3,81	100,00	54,00	100,00	2,00	**59,86**
n.º 10	**2**	0,00	0,00	0,32	0,12	67,30	36,34	100,00	2,00	**38,46**
n.º 40	**0,42**	0,00	0,00	0,00	0,00	30,65	16,55	100,00	2,00	**18,55**
n.º 80	**0,18**	0,00	0,00	0,00	0,00	5,27	2,85	91,29	1,83	**4,67**
n.º 200	**0,075**	0,00	0,00	0,00	0,00	1,05	0,57	77,73	1,55	**2,12**

Fonte: Acervo do autor (2019).

Gráfico 3: Enquadramento granulométrico - Traço B



Fonte: Acervo do autor (2019).

4.3 Fase 3: Dosagem asfáltica

Para a obtenção do teor ótimo de ligante asfáltico de cada traço, A e B, foi empregada a metodologia de dosagem Marshall. Para isso, foram moldados 9 corpos de prova em função de cada composição granulométrica.

Adotou-se para cada grupo de 3 corpos de prova, sendo ilustrados na Figura 18, os seguintes teores de ligante: 4,0%, 4,5% e 5,0%. Na Tabela 11 e na Figura 19, observa-se as propriedades da mistura, como a porcentagem de: volume de vazios (V_v), relação betume vazios (RBV), vazios do agregado mineral (VAM), além da densidade máxima teórica (DMT) e massa específica aparente (G_{mb}) em g/cm³ e estabilidade em kgf, da composição formada apenas por agregados convencionais.

Figura 18: Corpos de prova moldados

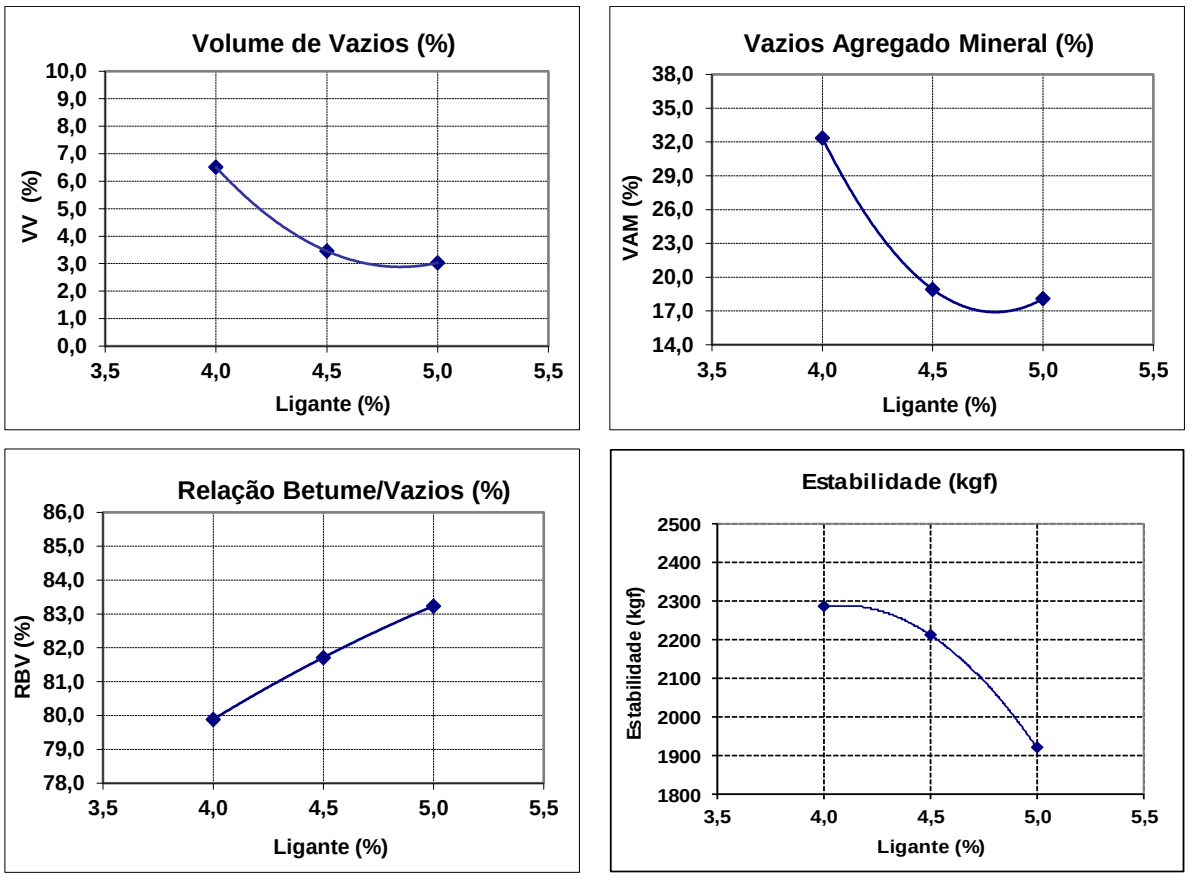
Fonte: Acervo do autor (2019).

Tabela 11: Propriedades volumétricas da mistura - Traço A

Propriedade	Teor de Ligante (%)		
	4,00	4,50	5,00
Volume de Vazios (%)	6,51	3,46	3,03
Relação Betume Vazios (%)	79,89	81,71	83,24
Vazios do Agregado Mineral (%)	32,37	18,92	18,08
Densidade Máxima Teórica (g/cm³)	2,50	2,48	2,46
Massa Específica Aparente (g/cm³)	2,33	2,39	2,38
Estabilidade (kgf)	2285,82	2213,54	1919,79

Fonte: Acervo do autor (2019).

Figura 19: Propriedades volumétricas da mistura - Traço A



Fonte: Acervo do autor (2019).

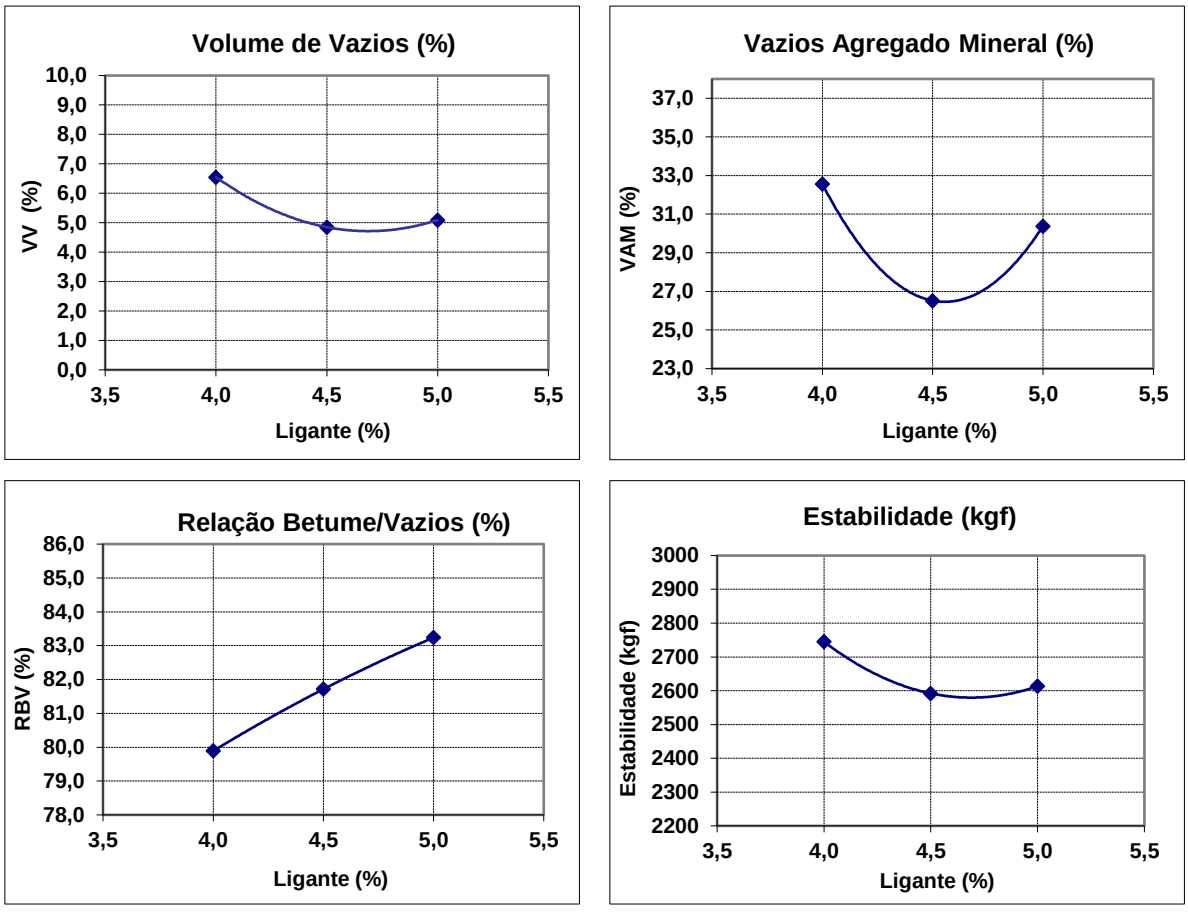
Na Tabela 12, apresentam-se as propriedades volumétricas do traço B e na Figura 20 são ilustrados através dos gráficos de volumetria, o qual é composto por agregados convencionais e também por polietileno de alta densidade reciclado. Nota-se que o traço B obteve maior estabilidade em relação aos valores obtidos no traço A.

Tabela 12: Propriedades volumétricas da mistura - Traço B

Propriedade	Teor de Ligante (%)		
	4,00	4,50	5,00
Volume de Vazios (%)	6,55	4,85	5,09
Relação Betume Vazios (%)	79,89	81,71	83,24
Vazios do Agregado Mineral (%)	32,60	26,5	30,40
Densidade Máxima Teórica (g/cm³)	2,22	2,20	2,19
Massa Específica Aparente (g/cm³)	2,07	2,10	2,08
Estabilidade (kgf)	2744,98	2592,02	2613,26

Fonte: Acervo do autor (2019).

Figura 20: Propriedades volumétricas da mistura - Traço B



Fonte: Acervo do autor (2019).

Em ambos traços, encontrou-se um teor ótimo de ligante de 4,50%. Conforme a especificação do DNIT-ES 031/2006 (DNIT, 2006c) as duas misturas asfálticas, satisfizeram os critérios de camada de rolamento, apresentando um volume de vazios entre 3,00 a 5,00%, sendo o traço A com 3,46% e o traço B com 4,85%, e

também obtiveram valores de RBV dentro dos limites (75,00 a 82,00%), no qual os dois obtiveram o valor de 81,71%.

4.4 Fase 4: Estudo das propriedades mecânicas

O critério escolhido para comparar o desempenho das misturas asfálticas estudadas foi a avaliação das propriedades mecânicas por meio da realização de dois ensaios, resistência à tração por compressão diametral e estabilidade Marshall. Para os ensaios mecânicos foram moldados 6 corpos de prova de cada traço, A e B, e utilizados 3 CPs para cada procedimento.

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi executado segundo a norma DNIT-ME 136/2010 e a estabilidade Marshall pela norma DNER-ME 043/95. Conforme revela os valores obtidos na Tabela 13, ambas misturas atenderam aos parâmetros estabelecidos pelo DNIT-ES 031/2006 (DNIT, 2006c), obtendo valores acima de 0,65 MPa para RT e valores acima de 500 kgf para estabilidade.

Tabela 13: Resultados dos ensaios mecânicos

	RT (MPa)	**Estabilidade (kgf)**
Traço A	0,66	2304,51
Traço B	0,73	2548,10

Fonte: Acervo do autor (2019).

Vasconcelos (2004) afirma que as propriedades volumétricas e mecânicas se fundam em vários fatores, entre eles: granulometria dos agregados, formato e textura dos grãos, método de compactação, propriedades do ligante asfáltico e o proporcionamento de agregados e ligante asfáltico. O traço B formado por agregados convencionais acrescido de resíduos de polietileno de alta densidade apresentou valores de RT e estabilidade cerca de 10,00% maiores que o traço A, composto apenas por agregados convencionais, o que evidencia não só a viabilidade de incorporação do PEAD, como melhora das propriedades mecânicas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o intuito de estudar a viabilidade do emprego de resíduos de polietileno de alta densidade por via seca em misturas asfálticas à quente, o presente trabalho constituiu-se de quatro fases, sendo elas: fase 1, seleção e caracterização dos materiais, agregados e ligante, fase 2, escolha da faixa granulométrica, traço A e traço B, fase 3, dosagem asfáltica pelo método Marshall e por fim, fase 4, estudo das propriedades mecânicas dos materiais através dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral e estabilidade Marshall.

Todas as fases seguidas se mostraram essenciais para confirmar a viabilidade de incorporação do agregado reciclado provenientes de polietileno de alta densidade. Devido ao fato de que as propriedades volumétricas e mecânicas de uma mistura asfáltica são diretamente relacionadas com a escolha do esqueleto constituinte e as características dos materiais, as frações de agregados e ligantes atribuídos e a metodologia de compactação empregada.

A possibilidade de utilizar um agregado alternativo reciclado na mistura asfáltica não é uma questão somente ambiental. O estudo apontou que foi possível melhorar as propriedades mecânicas, evidenciado pelos ensaios de resistência à tração por compressão diametral e estabilidade Marshall, sendo que a mistura asfáltica acrescida de PEAD, traço B, apresentou valores cerca de 10,00% maiores de RT e estabilidade do que a mistura formada apenas por agregados convencionais.

Em suma se faz necessário mais estudos sobre a inserção de resíduos de polietileno de alta densidade com o objetivo de qualificar o teor e o tamanho do agregado reciclado de PEAD ideal e ratificar através de outros ensaios mecânicos como módulo de resiliência e dano por umidade induzida, a melhora das propriedades mecânicas.

REFERÊNCIAS

_____. ABNT NBR 9935: **Agregados: terminologia**. ABNT, Rio de Janeiro, 2011.

_____. ABNT NBR 13230: **Embalagens e acondicionamentos plásticos recicláveis – identificação e simbologia**. ABNT, Rio de Janeiro, 2008.

ABEDA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTO. **Manual básico de emulsões asfálticas. Soluções para pavimentar sua cidade**. Rio de Janeiro: ABEDA, 2001.

ADADA, Lucas Bach. **Programa de integração e capacitação – DER/ 2008**. 89 slides. Disponível em: http://www.der.pr.gov.br/arquivos/File/RHTemp/PavimentosFlexiveiseRigidos_LucasAdada.pdf.

Agência nacional do petróleo, gás natural e biocombustíveis - ANP. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2019**. Rio de Janeiro, 2019. 264p.

ARAO, Mieka. **Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas com a inserção de polietileno tereftalato (PET) triturado**. Rio de Janeiro, RJ, 2016. 114 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2016.

ASPHALT INSTITUTE. **"Manual del Asfalto"**. Traducido por Manuel Velázquez. PROAS. España. Ediciones URMO, 1973.

ASPHALT INSTITUTE. **The Asphalt Handbook**. Lexington, Manual Series Nº4 (MS-4), 1989.

ASPHALT INSTITUTE. **Superpave mix design: Superpave series**. SP-2. 3. ed. [S.l.]: [s.n.], 2001.

AWWAD, M. T.; SHBEEB, L. **The use of polyethylene in hot asphalt mixtures**. American Journal of Applied Sciences 4 (6): 390-396, 2007.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais projetos e restauração**. São Paulo: Oficina de Texto, 2007. 558p.

BATALIONE, G. **Estabilização de solos tropicais com a utilização de rejeitos finos de pedreira de uma rocha granítica**. 2007. 172 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

BERNUCCI, L. L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros**. 3ª edição. Rio de Janeiro. Petrobrás. Abeda, 2008.

BOEIRA, F. D. **Estudo laboratorial do desempenho de misturas asfálticas com diferentes tipos e teores de cal**. 64p. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Civil. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, Ijuí, 2011.

BRASIL. Casa Civil da Presidência da República, Subchefia de Assuntos Jurídicos. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, e dá outras providências. Brasília, DF, 2010.

BRINGEL, R. M.; SOARES, S. A.; SOARES, J. B. **Propriedades químicas e reológicas de asfalto modificado por copolímero EVA**. Anais do 3° Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás. Salvador, BA, 2005.

CANDIAN, L. M. **Estudo Do Polietileno De Alta Densidade Reciclado Para Uso Em Elementos Estruturais**. São Carlos, 2007. 167p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CARVALHO, M. V. G. S. A. **Uma análise crítica de alguns processos empíricos de dimensionamento de pavimentos flexíveis**. 1999. 110p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Campinas, SP, 1999.

CERATTI, J. A. P.; REIS, R. M. M. **Manual de dosagem de concreto asfáltico**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 151p., il.

COLTRO, L.; DUARTE, L. C. **Reciclagem de Embalagens Plásticas Flexíveis: Contribuição da Identificação Correta**. Associação Brasileira de Polímeros São Paulo, Brasil. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 23, núm. 1, 2013, pp. 128-134.

CNT. **Pesquisa CNT de Rodovias: relatório gerencial**. Confederação Nacional do Transporte; Serviço Social do Transporte; Serviço Nacional de Aprendizagem do Transporte. Brasília: CNT: SEST SENAT, 2018.

CNT. **Transporte rodoviário: por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?** Confederação Nacional do Transporte; Serviço Social do Transporte; Serviço Nacional de Aprendizagem do Transporte. Brasília: CNT, 2017.

CRUZ, S. A.; FARAH, M.; ZANIN, M. ; BRETAS, R. E. S. **Avaliação das propriedades reológicas de blendas de PEAD virgem/PEAD reciclado**. Polímeros [online]. 2008, vol.18, n.2, pp.144-151.

CUNHA, M. B. **Avaliação do Método Bailey de Seleção Granulométrica de Agregados para Misturas Asfálticas**. São Carlos, 2004. 118 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

CUNHA, M. B.; GOUVEIA, L. T.; JÚNIOR, J. L. F; MOTTA, L. M. G. **Influência dos agregados sobre propriedades mecânicas e volumétricas de misturas asfálticas: análise do Método Bailey**. XVIII ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. Florianópolis, SC, 2004.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte – DNIT. **Manual de Pavimentação Rodoviária**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro, 2006a.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte – DNIT. **Glossário de Termos Técnicos Rodoviários**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro, 2017.

DER-SP. IP-DE-P00/001: **Avaliação funcional e estrutural de pavimento**. Instrução de Projeto. São Paulo, 2006.

DIAS, M. R. **Utilização de Mistura Asfáltica com Borracha pelo Processo da Via – Seca Execução de um Trecho Experimental Urbano em Porto Alegre – RS**. Porto Alegre, RS, 2005. 136p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

_____. DNER-ME 043/95. **Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro (RJ), 1995a.

_____. DNER-ME 081/98. **Agregados - determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro (RJ), 1998a.

_____. DNER-EM 083/98. **Agregados – análise granulométrica**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, RJ, 1998b.

_____. DNER-EM 084/95. **Agregado miúdo – determinação da densidade real**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, RJ, 1995b.

_____. DNIT-EM 095/2006. **Cimento Asfáltico de Petróleo – Especificação de Material**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, RJ, 2006b.

_____. DNIT-ES 031/2006: **Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, RJ, 2006c.

_____. DNIT-ME 136/2010: **Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, RJ, 2010.

FALCÃO, M. F. B.; SOARES, J. B. **Considerações Sobre o Ensaio de Compressão Diametral no Estudo de Materiais de Pavimentação**. XVI ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. Natal, RN, 2002.

FALEIROS, L. M. **Estradas: pavimento**. Franca, SP, USP – Curso de Engenharia Civil, Notas de aula, jul. 2005, 39p.

FERREIRA, J. L. S.; BASTOS, J. S.; SOARES, J. B. **Validação da metodologia de faixa de agregados dominantes para avaliação e especificação da granulometria de misturas asfálticas densas**. XXIX Congresso Nacional de Ensino e Pesquisa em Transportes, Ouro Preto – MG, 2015.

FERREIRA, J. L. S.; SOARES, J. B. E BASTOS, J. S. **Métodos de seleção granulométrica com foco na resistência a deformação permanente**. Revista Transportes, v. 24, n. 2. p. 46-52, 2016.

FILHO, J. M. M.; ROCHA, E. G. A. **Estudo Comparativo entre Pavimentos Flexível e Rígido na Pavimentação Rodoviária**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 03, Ed. 06, Vol. 02, pp. 146-163, jun. 2018.

GLOVER, I. C. **Wet and dry agingof polymer-asphalt blends: chemistry and performance**. Dissertação (Mestrado), 172 p. Graduate Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, 2007.

GOUVEIA, L. T. **Contribuições ao estudo da influência de propriedades de agregados no comportamento de misturas asfálticas densas**. São Paulo, 2006. 340 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo, 2006.

HARMAN, T.; BUKOWSKI, J.R.; MOUTIER, F.; HUBER, G.; MCGENNIS, R. **The history and future challenges of gyratory compaction 1939 to 2001**. In: Annual meeting of the transportation research board, 81, 2002, Washington.

HIRSCH, F. **Estudo do Comportamento de Misturas Asfálticas Preparadas com Diferentes Tipos de Ligantes**. 130f. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil, Universidade do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2007.

LEANDRO, R. P. **Avaliação do comportamento mecânico de corpos de prova de misturas asfálticas a quente resultantes de diferentes métodos de compactação**. São Paulo, 2016. 287 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo, 2016.

LEITE, L. F. M. **Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímeros**. 1999. 266 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Polímeros) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

MANO, E. B.; PACHECO, E. B. M. A.; BONELLI, C. M. C. **Meio ambiente, poluição e reciclagem**. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

MENDES, L. O.; MARQUES, G. L. O**. Avaliação da influência do Método Bailey no processo de dosagem e desempenho de misturas asfálticas**. Revista Transportes, v. 20, n. 4. p. 35-43, 2012.

MOGHADAS NEJAD, F.; ARABANI, M.; HAMEDI, G. H.; AZARHOOSH, A. R. **Influence of using polymeric aggregate treatment on moisture damage in hot mix asphalt**. Construction and Building Materials, 47, 1523–1527, 2013.

MOTTA, L. M. G.; I. TONIAL; L. M. F. LEITE; R. S. CONSTANTINO. **Princípios do Projeto e Análise Superpave de Misturas Asfálticas**. Tradução comentada, Rio de Janeiro, RJ, 1996.

MOURA, E. **Estudo de deformação permanente em trilha de roda misturas asfálticas em pista e em laboratório**. São Paulo, 2010. 299 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo, 2010.

OZÓRIO, M. da S.; SOUZA FILHO, M. P. de; ALVES, N.; JOB, A. E. **Promovendo a conscientização ambiental: resultados de uma pesquisa realizada com alunos**

do ensino médio sobre polímeros, plásticos e processos de reciclagem. Revista Brasileira De Educação Ambiental, 10(2), 11-24, 2015.

PAZOS, A. G. **Efeito de propriedades morfológicas de agregados no comportamento mecânico de misturas asfálticas**. Rio de Janeiro, 2015. 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. COPPE, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia. Rio de Janeiro, 2015.

PEREIRA, K. L. A. **Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos**. 2012. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Natal, 2012.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. **Pavimentação Rodoviária: Conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. 259p. Rio de Janeiro, RJ, 2001.

PREGO, A. S. S. **A memória da pavimentação no Brasil**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Pavimentação, 2001.

QUINTANA, H. A. R.; RINCÓN, E. R.; ANSELMI, L. A. M. **Resistencia Mecánica Evaluada en el Ensayo Marshall de Mezclas Densas en Caliente Elaboradas con Asfaltos Modificados con Desechos de Policloruro de Vinilo (Pvc), Polietileno de Alta Densidad (Pead) y Poliestireno (Ps)**. Revista Ingenierías, Universidad de Medellín. Vol. 6. 2007. pp. 91-104.

QUINTANA, H. A. R.; ANSELMI, L. A. M.; URREGO, D. R.; MARIÑO, J. L. **Experiencias sobre el estudio de materiales alternativos para modificar asfaltos.** Revista Ingeniería, vol. 14, núm. 2, 2009, pp. 19-33.

RÄDER, A. R. S. **Estudo da Adição de Resíduos de Garrafas PET Pós-Consumo em Misturas Asfálticas à Quente**. 99p. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado na Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUI, 2018.

REZENDE, L. R.; SILVEIRA, L. R.; ARAÚJO, W. R.; LUZ, M. P. **Reuse of Fine Quarry Wastes in Pavement: Case Study in Brazil**. Journal of Materials in Civil Engineering. Vol. 26, Nº 8, August 2014.

RIBEIRO, T. P. **Estudo Descritivo das Principais Patologias em Pavimento Flexível**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Edição 04. Ano 02, Vol. 01. pp. 733-754, jul. 2017.

ROBERTS, F. L.; KANDHAL, P. S.; BROWN, E. R.; LEE, D-Y.; KENNEDY, T. W. **Hot mix asphalt materials, mixture, design, and construction**. 2. ed. Lanham: Napa Education Foundation, 1996.

ROBERTS, F. L.; MOHAMMAD, L. N.; WANG, L. History of Hot Mix Asphalt Mixture Design. Journal of Materials in Civil Engineering, 2002. 279-293.

ROSA, G. A.; SANTOS, R. A.; CRISPIM, F. A.; RIVA, R. D. D. **Análise comparativa entre asfalto modificado com borracha reciclada de pneus e asfalto modificado com polímeros**. Revista Teoria e Prática na Engenharia Civil, n.20, p.31-38, nov. 2012.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. Editora PINI LTDA. 746p. São Paulo, SP, 1997.

SOUSA, J. B.; HARVEY, J.; PAINTER, L.; DEACON, J. A.; MONISMITH, C. L. **Evaluation of Laboratory Procedures for Compacting Asphalt-Aggregate Mixtures**. Strategic Highway Research Program (SHRP). Washington, D.C. 1991.

SPECHT, L. P. **Avaliação de Misturas Asfálticas com Incorporação de Borracha Reciclada de Pneus**. 2004. 279f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

VASCONCELOS, K. L. **Comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente dosadas pelas metodologias Marshall e Superpave com diferentes granulometrias**. 2004. 149 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, 2004.

VASCONCELOS, K.; SOARES, J. B. **Efeito do procedimento de dosagem no teor de projeto e comportamento mecânico de misturas asfálticas**. 2015. Disponível em: <https://www.academia.edu/21873054/>. Acesso em: 18 nov. 2018.

VAVRIK, W. R.; PINE, W. J.; HUBER, G.; CARPENTER, S. H.; BAILEY, R. **The Bailey Method of Gradation Evaluation: The Influence of Aggregate Gradation and Packing Characteristics on Voids in Mineral Aggregate**. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 70, 2001.

WHITE, T. D. **Marshall procedures for design and quality control of asphalt mixtures**. Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists Technical Sessions, San Antonio, v. 54, 1985.