

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

JOÃO VICTOR SILVA AGUIAR

**UTILIZAÇÃO DE CINZAS VOLANTES EM MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE
– CONCRETO ASFÁLTICO**

São Luís
2019

JOÃO VICTOR SILVA AGUIAR

**UTILIZAÇÃO DE CINZAS VOLANTES EM MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE
– CONCRETO ASFÁLTICO**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil da
Universidade Estadual do Maranhão – UEMA para
obtenção do grau em bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Teresinha de Medeiros
Coelho

São Luís
2019

Aguiar, João Victor Silva.

Utilização de cinzas volantes em misturas asfálticas a quente – concreto asfáltico / João Victor Silva Aguiar. – São Luís, MA, 2019.

83f

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Maranhão, 2019.

Orientador: Profa. Dra. Maria Teresinha de Medeiros Coelho.

JOÃO VICTOR SILVA AGUIAR

**UTILIZAÇÃO DE CINZAS VOLANTES EM MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE
– CONCRETO ASFÁLTICO**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil da
Universidade Estadual do Maranhão – UEMA para
obtenção do grau em bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 09/12/2019

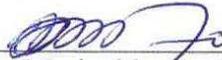
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dra. Maria Teresinha de Medeiros Coelho (Orientadora)
Doutora em Urbanismo
Universidade Estadual do Maranhão



Prof. Dr. Walter Canales Sant'Ana
Doutor em Engenharia de Transportes
Universidade Estadual do Maranhão



Prof. Msc. Marivaldo Costa Duarte
Mestre em Engenharia Mecânica
Universidade Estadual do Maranhão

AGRADECIMENTOS

Às mulheres que tornaram possível que eu chegasse até aqui, minhas avós Raimunda Gomes Passos Aguiar e Maria de Fátima Rodrigues Silva, minha tia Helena Gomes Passos Aguiar e minha mãe Jacyra Rodrigues Silva. Amo vocês.

Ao Rodrigo de Sousa Rabelo, por ter me auxiliado na escolha do tema e por sempre estar à disposição para me ajudar.

Ao professor Clebson Santos, por ter me disponibilizado as cinzas e por, assim, ter feito possível a realização desta pesquisa.

À professora Maria Teresinha, por toda paciência, orientação e dedicação ao longo deste trabalho.

Aos meus amigos Filipe Alexandrino e Carlos Breno, por todas as risadas, por estarem sempre ao meu lado e por terem tornado esta jornada que se encerra menos árdua.

Aos meus companheiros de curso e, agora, de profissão, André, Judah, João Pedro, Antonio Paulo e Carlos Eduardo.

À Universidade Estadual do Maranhão, pelo amadurecimento pessoal e profissional.

Enfim, a todos que de alguma forma fizeram parte desta caminhada e que torceram por mim.

Muito obrigado a todos!

“The sun ’ll come out. Nothing good ever comes easy. I know times are rough but winners don’t quit so don’t give up”.

Kali Uchis

RESUMO

A construção e manutenção de estradas demandam uma grande quantidade de materiais de boa qualidade, que estão se tornando mais escassos. É necessário, assim, encontrar materiais alternativos que possuam características físicas e químicas que os permitam ser utilizados na pavimentação. Este estudo tem como objetivo avaliar a influência da utilização das cinzas volantes, resíduos sólidos gerados nas termelétricas, em revestimentos asfálticos a quente do tipo concreto asfáltico. Para isto, corpos de prova foram moldados com diferentes teores de ligante (4,5 a 5,5) %, usando 3% de cimento no traço controle e variando a porcentagem de cinza volante (3 e 6) % nas misturas modificadas. Os resultados dos ensaios demonstraram que as misturas com cinzas volantes apresentam valores de estabilidade abaixo dos obtidos pela mistura controle, e que apresentam valores de resistência à tração superiores.

Palavras-chave: Cinzas volantes. Revestimento asfáltico. Concreto asfáltico.

ABSTRACT

Road construction and maintenance requires a large amount of good quality materials, which are becoming scarcer. It's therefore necessary to find alternative materials which have physical and chemical characteristics to be used for pavement. This study investigates the effect of use fly ash, solid waste generated in thermoelectric plants, in asphalt concrete. In view of the same, hot mix asphalt's samples were prepared for different bitumen content (4.5 to 5.5) %, using 3% cement as control trace and varying the fly ash percentage (3 and 6) % in modified mixtures. From the analysis of the laboratory tests, fly ash mixes have below stability results. Additionally, mixes with fly ash behaves superiorly when compared to other conventional mix in traction resistance by diametrical compression.

Keywords: Fly ash. Hot mix asphalt. Asphalt concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Matriz elétrica brasileira de 2017	19
Figura 2 - Matriz elétrica brasileira de 2018	20
Figura 3 - Esquema de combustão de uma termelétrica.....	22
Figura 4 - Partículas de cinzas volantes com ampliação de 2.000x	23
Figura 5 - Imagens microscópicas da cinza volante (esquerda) e do cimento (direita).....	23
Figura 6 - Pavimento de concreto com uso de cinza volante	25
Figura 7 - Recuperação da camada de pavimento utilizando cinzas volantes.....	26
Figura 8 - Mistura e modelagem de solo estabilizado com cinzas volantes.....	27
Figura 9 - Stone Matrix Asphalt com cinzas volantes.....	28
Figura 10 - Estrutura do pavimento flexível.....	29
Figura 11 - Estrutura do pavimento rígido	29
Figura 12 - Composições granulométricas dos tipos de misturas a quente	33
Figura 13 - Fluxograma da parte experimental	37
Figura 14 - Agregados	38
Figura 15 - Materiais de enchimento: cinza volante (à esquerda) e cimento (à direita).....	38
Figura 16 - CAP 50/70	39
Figura 17 - Ilustração da análise por peneiramento.....	40
Figura 18 - Frasco Chapman	41
Figura 19 - Pesagem do agregado graúdo	41
Figura 20 - Máquina abrasiva "Los Angeles"	44
Figura 21 - Amostra após o ensaio de abrasão	44
Figura 22 - Solução de trabalho.....	46
Figura 23 - Proveta	46
Figura 24 - Sedimentação da amostra.....	46
Figura 25 - Pistão colocado na proveta	46
Figura 26 - Paquímetro	48
Figura 27 - Exemplo de agregados com diferentes formas	49
Figura 28 - Agregado envolvido com ligante.....	50
Figura 29 - Amostra exposta sobre a placa.....	50
Figura 30 - Frasco Le Chatelier.....	51
Figura 31 - Cinza colocada no frasco	51
Figura 32 - Esquema do ensaio de penetração	53

Figura 33 - Vista do penetrômetro.....	53
Figura 34 - Aparelho montado do ensaio do ponto de amolecimento.....	55
Figura 35 - Saybolt-Furol	56
Figura 36 - Realização do ensaio de viscosidade I.....	56
Figura 37 - Realização do ensaio de viscosidade II.....	57
Figura 38 - Controle da temperatura de mistura.....	58
Figura 39 - Moldes de compactação.....	58
Figura 40 - Compactador	59
Figura 41 - Controle da temperatura de compactação.....	59
Figura 42 - Corpos de prova em banho-maria.....	60
Figura 43 - Molde de compressão	60
Figura 44 - Prensa Marshall	60
Figura 45 - Volumetria da mistura asfáltica	62
Figura 46 - Molde com frisos metálicos.....	63
Figura 47 - Adesividade insatisfatória.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Oferta e consumo de energia no Brasil em 2019.....	20
Tabela 2 - Oferta interna de energia no Brasil e no Mundo (% e tep).....	21
Tabela 3 - Comparativo entre pavimentos flexíveis e rígidos	30
Tabela 4 - Faixas do DNIT para concreto asfáltico	39
Tabela 5 - Massa mínima, por amostra de ensaio (análise granulométrica).....	40
Tabela 6 - Massa mínima de amostra de ensaio (massa específica).....	42
Tabela 7 - Graduação para ensaio de abrasão “Los Angeles”	43
Tabela 8 - Carga abrasiva	44
Tabela 9 - Quantidade mínima de material para ensaio (forma das partículas)	47
Tabela 10 - Classificação da forma dos agregados	49
Tabela 11 - Granulometria do fíler	51
Tabela 12 - Dimensões do recipiente de ensaio (penetração)	52
Tabela 13 - Critérios para indicação de resultado de penetração	54
Tabela 14 - Resultados da granulometria	64
Tabela 15 - Comparação da granulometria da cinza volante.....	65
Tabela 16 - Resultados das massas específicas	65
Tabela 17 - Resultados da absorção dos agregados graúdos	66
Tabela 18 - Resultado do equivalente de areia	66
Tabela 19 - Resultados da resistência à abrasão	66
Tabela 20 - Resultados do ensaio de penetração	67
Tabela 21 - Resultado do ensaio de ponto de amolecimento	68
Tabela 22 - Resultados do ensaio de viscosidade.....	68
Tabela 23 - Enquadramento granulométrico do Traço 1	69
Tabela 24 - Enquadramento granulométrico do Traço 2	70
Tabela 25 - Enquadramento granulométrico do Traço 3	71
Tabela 26 - Parâmetros volumétricos do Traço 1.a	72
Tabela 27 - Resultados mecânicos do Traço 1.a	72
Tabela 28 - Parâmetros volumétricos dos traços	73
Tabela 29 - Resultados mecânicos dos traços	74

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curvas granulométricas	64
Gráfico 2 - Viscosidade Saybolt-Furol <i>versus</i> temperatura	68
Gráfico 3 - Curva granulométrica do Traço 1	69
Gráfico 4 - Curva granulométrica do Traço 2	70
Gráfico 5 - Curva granulométrica do Traço 3	71
Gráfico 6 - Volume de vazios <i>versus</i> teor de ligante.....	73
Gráfico 7 - Volume do agregado mineral <i>versus</i> teor de ligante.....	74
Gráfico 8 - Relação betume/vazios <i>versus</i> teor de ligante.....	74
Gráfico 9 - Estabilidade <i>versus</i> teor de ligante.....	75
Gráfico 10 - RT <i>versus</i> teor de ligante	75
Gráfico 11 - Resultados de estabilidade obtidos por Mistry e Roy	76
Gráfico 12 - Resultados de estabilidade obtidos por Bohara e Tamrakar	76
Gráfico 13 - Teor ótimo para o Traço 1.b (6% CV).....	76
Gráfico 14 - Teor ótimo para o Traço 2 (3% CV).....	77
Gráfico 15 - Teor ótimo para o Traço 3 (3% C).....	77

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivos	14
1.1.1 Objetivo geral	14
1.1.2 Objetivos específicos.....	14
2 REFERÊNCIAL TEÓRICO	15
2.1 Resíduos sólidos	15
2.1.1 Definição e classificação	15
2.1.2 Resíduos industriais.....	16
2.1.2.1 Tratamento de resíduos sólidos industriais.....	16
2.1.2.2 Disposição de resíduos sólidos industriais	16
2.1.3 A Lei e a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).....	17
2.2 Balanço energético	18
2.2.1 Cenário demográfico, crescimento da economia e demandas da energia	18
2.2.2 Matriz elétrica brasileira.....	19
2.3 Cinzas volantes	21
2.3.1 Definição e Produção.....	21
2.3.2 Características.....	22
2.3.2.1 Propriedades Físicas	22
2.3.2.2 Propriedades Químicas	23
2.3.3 Aplicações	24
2.3.3.1 Cinzas volantes no concreto de cimento Portland.....	24
2.3.3.2 Cinzas volantes na estabilização da camada de base do pavimento.....	25
2.3.3.3 Cinzas volantes na estabilização de solos.....	26
2.3.3.4 Cinza volante em misturas asfálticas a quente	27
2.4 Pavimento	28
2.4.1 Definição	28
2.4.2 Classificação	28
2.4.3 Estrutura do pavimento.....	31
2.5 Misturas asfálticas a quente	32
2.5.1 Generalidades	32
2.5.2 Classificação	32
2.5.3 Concreto asfáltico	33

2.5.4 Propriedades dos agregados.....	33
2.6 Fíler mineral.....	35
3 METODOLOGIA.....	37
3.1 Materiais.....	38
3.2 Ensaio de caracterização	39
3.2.1 Ensaio de caracterização dos agregados	39
3.2.1.1 Análise granulométrica.....	39
3.2.1.2 Massa específica	41
3.2.1.3 Resistência à abrasão	43
3.2.1.4 Equivalente de areia	45
3.2.1.5 Forma das partículas	47
3.2.1.6 Adesividade	49
3.2.2 Ensaio de caracterização das cinzas.....	50
3.2.2.1 Análise granulométrica.....	50
3.2.2.2 Massa específica	51
3.2.3 Ensaio de caracterização do ligante	52
3.2.3.1 Penetração.....	52
3.2.3.2 Ponto de amolecimento	54
3.2.3.3 Viscosidade do material betuminoso.....	55
3.2.4 Dosagem e ensaios mecânicos da mistura asfáltica	57
3.2.4.1 Dosagem Marshall.....	57
3.2.4.1.1 Estabilidade e Fluência.....	57
3.2.4.1.2 Parâmetros volumétricos	61
3.2.4.2 Resistência à tração por compressão diametral	62
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
4.1 Ensaio de caracterização dos agregados e do fíler	64
4.2 Ensaio de caracterização do ligante	67
4.3 Traços e ensaios mecânicos da mistura	69
5 CONCLUSÃO.....	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, existe uma preocupação com a gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, devido à elevada carga de acúmulo desses materiais que são dispostos no meio ambiente e que podem causar sérios danos à saúde humana e à natureza.

A cinza é um resíduo da combustão do carvão mineral nas usinas termelétricas e que é formada a partir dos componentes não queimados da matéria prima. Desse processo se obtém dois tipos básicos de cinza: a cinza pesada que é o material aglomerado no fundo da câmara de combustão, e a cinza volante, que por ser mais leve, é arrastada pelos gases do processo (ANDRADE, 1991).

Em 2001, segundo a ACAA (2017), foram geradas cerca de 68 milhões de toneladas de cinzas volantes nos Estados Unidos, sendo que apenas 32,3% desse total foram reaproveitados. Já na Índia, segundo o *Ministry of Environment and Forests* (2007, apud PANDEY; ABHILAH; SINGH, 2009) foram produzidas 112 milhões de toneladas entre 2005 e 2006. De acordo com o mesmo órgão, em 2016, a porcentagem de cinzas reutilizadas chegou a 57,63%.

Diferentemente do Brasil, os Estados Unidos e a Índia estão entre os maiores usuários de carvão mineral. Enquanto no mundo, de acordo com Morais (2015), o carvão mineral representa 62% da produção de energia elétrica, no Brasil esse número corresponde a 1,3%. Contudo, o país sofre com o mesmo problema de destinação das cinzas volantes, mesmo que em menor escala. Segundo a ANNEL (2003, apud KALKREUTH *et al.*, 2008), o Brasil produz aproximadamente 3 milhões de toneladas por ano de cinza, das quais 65 a 85% são compostas por cinza volante e o restante de cinza pesada.

No estado do Maranhão, a usina termelétrica do Porto do Itaqui tem uma potência de 360 MW, operando com carvão colombiano que contém cerca de 8 a 10% de cinzas. A usina, em regime de operação plena, produz diariamente 519 toneladas de resíduos, dos quais 25 t são de cinza pesada, 230 t de cinzas volantes, 144 t de resíduos de dessulfuração e 120 t de lodo de clarificação de água do mar. No porto existe uma bacia que comporta 53.760 m³ de resíduos, o que permite um depósito de material correspondente a quatro meses (ROHDE; MACHADO, 2016).

As cinzas volantes podem ser usadas como substitutas do cimento nas placas de concreto do pavimento rígido, na fabricação de bloquetes para pavimento intertravado, nas argamassas,

e como material de enchimento em misturas usinadas a quente, como é o caso do estudo deste trabalho. Quando disponíveis na região, as cinzas chegam a custar menos que outros fíleres minerais. Além disso, por possuir peso específico muito baixo, a cinza consegue um desempenho similar usando menos material por peso, reduzindo, assim, o custo da produção da mistura asfáltica (ACAA, 2017).

As propriedades da cinza variam de acordo com a jazida de exploração do carvão mineral. Contudo, as cinzas volantes normalmente cumprem, segundo a ACAA (2017), os requisitos estabelecidos pelas normas quanto à graduação, impurezas e plasticidade. Além disso, a cinza volante é hidrofóbica, ou seja, não molhável em água, reduzindo o potencial de remoção de asfalto; a presença de calcário em algumas cinzas pode também reduzir a decapagem.

Outros benefícios da utilização de cinza volante no revestimento asfáltico são mencionados por Remme *et al.* (2016), como o aumento da trabalhabilidade devido à facilidade da compactação, o atraso do enrijecimento do ligante asfáltico e o alívio das tensões térmicas acumuladas na mistura, reduzindo assim o aparecimento de trincas devido à variação de temperatura.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Estudar a utilização de cinza volante em revestimentos asfálticos do tipo CAUQ.

1.1.2 Objetivos específicos

- Determinar por meio de ensaios laboratoriais as propriedades físicas da cinza, dos agregados e do ligante asfáltico.
- Estudar a mistura asfáltica com cinza volante com diferentes teores de ligantes.
- Analisar as características mecânicas da mistura asfáltica a quente com adição de cinzas.
- Comparar os resultados obtidos com outros estudos.

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

2.1 Resíduos sólidos

2.1.1 Definição e classificação

De acordo com a NBR 10004 (2004), os resíduos sólidos são definidos como:

Resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (NBR 10004, 2004, p. 1).

Os resíduos sólidos são classificados através da identificação do processo ou atividades responsáveis por sua produção, de seus elementos constituintes e propriedades, e comparação destes constituintes com outras substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido. Segundo a NBR 10004 (2004), os resíduos sólidos se classificam, quanto aos riscos potenciais de contaminação do meio ambiente, em:

- resíduos classe I – perigosos: são aqueles que suas características físicas, químicas ou infectocontagiosas oferecem “risco à saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices”, e riscos ao meio ambiente, “quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada”, podendo ser inflamável, corrosivo, reativo, tóxico e patogênico;
- resíduos classe II A – não inertes: são aqueles que podem possuir propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água, podendo acarretar riscos à saúde ou ao meio ambiente;
- resíduos classe II B – inertes: são quaisquer resíduos que, por suas características intrínsecas, não oferecem riscos à saúde ou ao meio ambiente, e que não têm nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, ressalvando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor, quando submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada à temperatura ambiente.

2.1.2 Resíduos industriais

[Lixo industrial] Aquele originado nas atividades dos diversos ramos da indústria, tais como metalúrgica, química, petroquímica, papelreira, alimentícia etc. O lixo industrial é bastante variado, podendo ser representado por cinzas, lodos, óleos, resíduos alcalinos ou ácidos, plásticos, papéis, madeiras, fibras, borrachas, metais, escórias, vidros e cerâmicas etc. Nesta categoria, inclui-se a grande maioria do lixo considerado tóxico (AMORMINO JUNIOR, 2018, p. 30).

Quanto à natureza ou origem, os resíduos podem ser classificados como resíduos industriais quando gerados por atividades industriais. Apresentam características variadas, pois dependem do tipo de produto manufaturado ou serviço prestado e, por isso, devem ser estudados caso a caso (MONTEIRO *et al.*; 2001).

2.1.2.1 Tratamento de resíduos sólidos industriais

De acordo com Monteiro *et al.* (2001), além da reciclagem que visa transformar os resíduos em matéria-prima, reduzindo custos no processo industrial, os processos de tratamento de resíduos sólidos industriais mais comuns são:

- neutralização, quando os resíduos apresentarem características ácidas ou alcalinas;
- secagem ou mescla, por meio da mistura de resíduos que possuem alto teor de umidade com outros resíduos secos ou com materiais inertes;
- encapsulamento, através do revestimento dos resíduos com uma camada de resina sintética impermeável e de baixo índice de lixiviação;
- incorporação, quando os resíduos são usados na fabricação de concreto ou de cerâmica, ou ainda quando podem ser adicionados a materiais combustíveis sem gerar gases prejudiciais ao meio ambiente após o processo de combustão;
- incineração ou pirólise que são processos de destruição térmica.

2.1.2.2 Disposição de resíduos sólidos industriais

Ainda segundo Monteiro *et al.* (2001), os métodos de destinação de resíduos sólidos industriais mais empregados são: landfarming, aterros industriais e barragens de rejeito.

Landfarming é um método que consiste na aplicação do resíduo na superfície reativa do solo, de modo a reduzir as concentrações dos componentes do petróleo por meio da biodegradação microbiana (US EPA, 2000). Os microrganismos degradantes de hidrocarbonetos de petróleo são as bactérias aeróbias e anaeróbias, os fungos e as microalgas (MPHEKGO; CLOETE, 2004 apud SILVA, 2009).

Os aterros industriais procuram confinar os resíduos sólidos na menor área e reduzi-los ao menor volume possível. Nesse tipo de disposição, os resíduos são cobertos consecutivamente com camadas de solos, formando as células, que justapostas constituem os aterros (NASCIMENTO; HYPOLITO; RIBEIRO, 2006). Na estrutura, são necessários sistemas de drenagem pluvial e a impermeabilização do leito para evitar que a água da chuva percole através das camadas e contamine o solo ou o lençol freático (MONTEIRO *et al.*, 2001).

Já as barragens de rejeito são utilizadas para disposição de resíduos líquidos e pastosos, que tenham teor de umidade maior que 80%. Apresentam um sistema de filtração e drenagem de fundo para captação e tratamento do montante líquido, fazendo com que a matéria sólida se estabeleça no interior da barragem. A estrutura, ainda, é impermeabilizada quando o rejeito se encontra solidificado com uma camada de argila para reduzir a infiltração de líquidos (MONTEIRO *et al.*, 2001).

2.1.3 A Lei e a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)

A Política Nacional de Resíduos Sólidos reúne o conjunto de princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes, metas e ações adotados pelo Governo Federal, isoladamente ou em regime de cooperação com Estados, Distrito Federal, Municípios ou particulares, com vistas à gestão integrada e ao gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos (BRASIL, 2010).

A Lei N° 12.305 institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, que por sua vez define princípios, objetivos, instrumentos e diretrizes para a gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos. Além disso, a Lei estabelece a diferença entre resíduo e rejeito: enquanto resíduos devem ser reaproveitados e reciclados, os rejeitos não apresentam outra possibilidade que não seja a disposição final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010).

De acordo com Santos e Dias (2012), a Política Nacional de Resíduos Sólidos é uma lei ambiental que deve obrigatoriamente se relacionar com as questões de recursos públicos, de saúde pública e com demais temas ligados ao meio ambiente.

Entre os princípios da PNRS estão o desenvolvimento sustentável, a cooperação entre as diferentes esferas do poder público, o setor empresarial e demais segmentos da sociedade, a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos e o reconhecimento do resíduo sólido reutilizável e reciclável como um bem econômico e de valor social, que gera trabalho e renda e promove a cidadania (BRASIL, 2010).

O MMA (2012) enfatiza um dos principais objetivos da Lei 12.305, que é o estabelecimento de uma ordem obrigatória de prioridade para a gestão de resíduos: não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos e disposição final dos

rejeitos de forma adequada. Além disso, são objetivos da PNRS a adoção, desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias limpas, a gestão integrada, o incentivo à indústria de reciclagem etc.

Para atingir tais objetivos, a Política Nacional de Resíduos Sólidos faz uso de instrumentos como a coleta seletiva, os sistemas de logística reversa, o monitoramento e a fiscalização ambiental, sanitária e agropecuária, a pesquisa científica e tecnológica, educação ambiental etc. (BRASIL, 2010).

2.2 Balanço energético

2.2.1 Cenário demográfico, crescimento da economia e demandas da energia

Para Ventura Filho (2009), as demandas energéticas são estabelecidas a partir de dois fatores: evolução populacional e crescimento da economia. Mesmo que o país venha obtendo taxas de crescimentos anuais reduzidas, os incrementos anuais da população e da economia com as consequentes demandas de energia em valores absolutos são elevados, em função do porte atual da economia nacional e da população.

O uso de energia no Brasil apresentou incrementos elevados a partir do término da Segunda Guerra Mundial, impulsionado pelo expressivo processo de industrialização, crescimento demográfico, aumento da taxa de urbanização e, também, pela construção de uma infraestrutura de transporte rodoviário (TOLMASQUIM; GUERREIRO; GORINI, 2007).

Entre os anos 1940 e 1950, o país tinha uma população aproximada de 41 milhões de habitantes, dos quais 69% se encontrava no meio rural, e um consumo energético de apenas 15 milhões de tep (tonelada equivalentes de petróleo). Na década de 1970, a demanda de energia primária não chegava a 70 milhões de tep, enquanto a população era de 93 milhões de habitantes. Já em 2000, a demanda energética chegou a 190 milhões de tep, um aumento de quase 200%, e a população ultrapassava 170 milhões de habitantes (TOLMASQUIM; GUERREIRO; GORINI, 2007).

Embora, tenha ocorrido um aumento da demanda energética durante as últimas décadas, o consumo per capita de energia continuou muito baixo. O cenário traçado para 2030 é uma estimativa de consumo de energia primária de aproximadamente 560 milhões de tep para mais de 238 milhões de habitantes, o que resultaria em um acréscimo considerável de demanda per capita, ocasionado pelo acréscimo de renda nacional e pela sua redistribuição (TOLMASQUIM; GUERREIRO; GORINI, 2007).

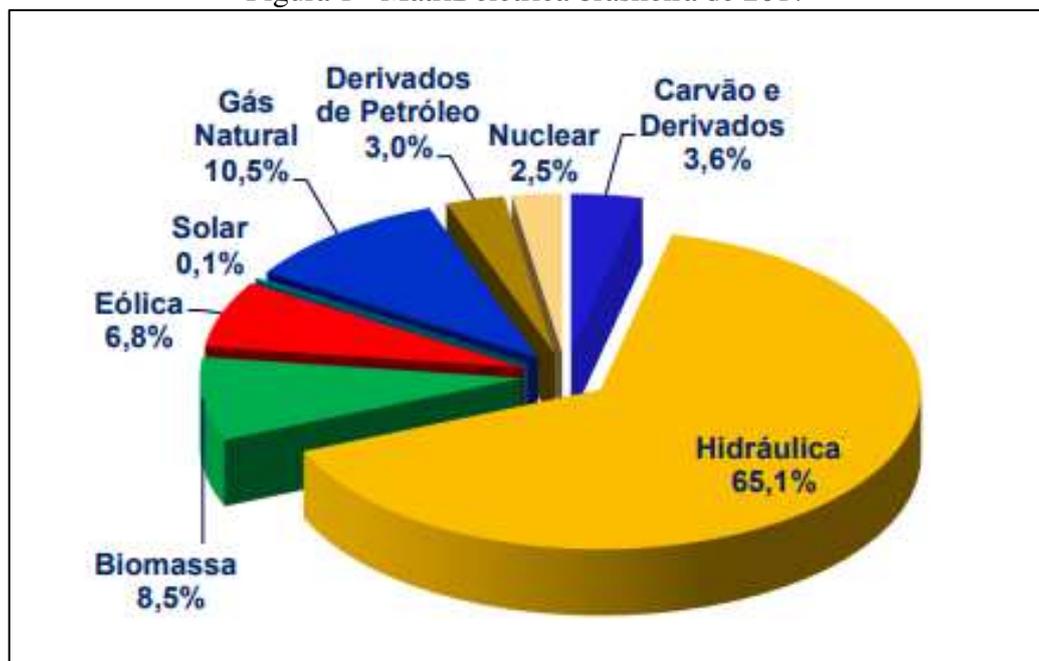
Entre 1978 e 2005, a economia do país cresceu a 2,5% ao ano, taxa média inferior à taxa mundial de 3,3%. Já em relação a energia, ocorreu o contrário, o Brasil teve um crescimento do consumo energético maior que o mundial, aumentando assim o conteúdo energético da economia em tep/US\$ de PIB. A projeção de 2030 é que o país passe a crescer em termos econômicos e de consumo de energia, com taxas mais elevadas que as do mundo (VENTURA FILHO, 2009).

No último balanço energético divulgado pela Empresa de Pesquisa Energética, o país em 2018 alcançou uma oferta interna de energia, ou seja, o total de energia disponibilizada, de 288,4 milhões de tep, registrando um decréscimo de 1,7% em relação ao ano de 2017. Contudo, o consumo final de eletricidade no país aumentou em 1,4%, graças ao setor residencial que expandiu seu consumo em 1,8 TWh (+1,3%), e aos setores energético 1,7 TWh (+5,4%), industrial 1,2 TWh (+0,6%) e agropecuário 1,1 TWh (+3,9%).

2.2.2 Matriz elétrica brasileira

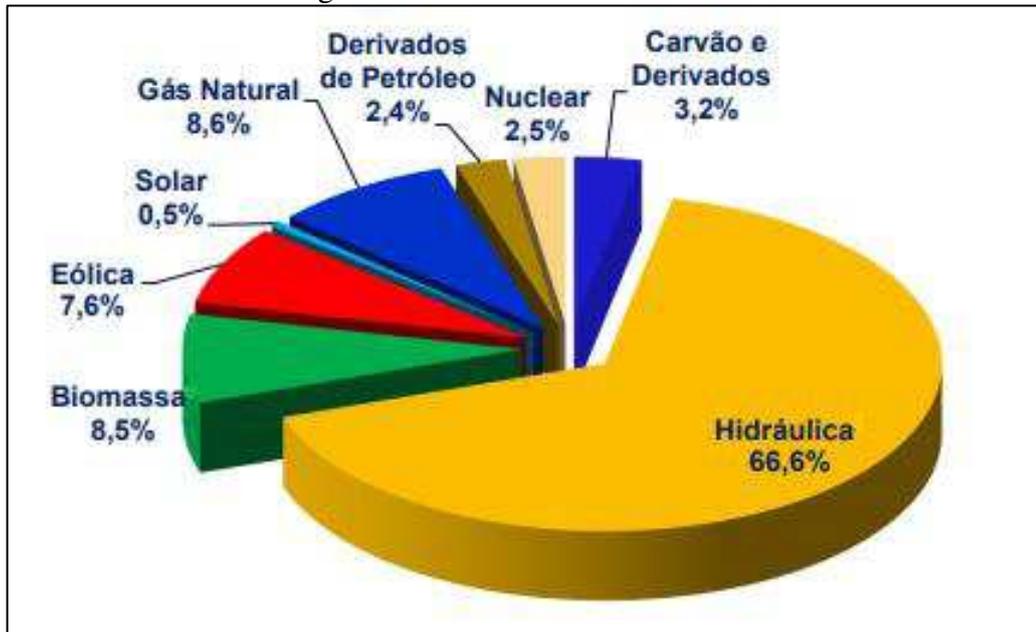
Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a energia hidráulica representou, em 2018, 66,6% da matriz elétrica brasileira, ofertando aproximadamente 424 TWh. O ano foi marcado pelo aumento significativo da geração hidráulica, eólica e solar quando comparado ao ano anterior. Enquanto a geração a partir da biomassa, outra fonte renovável, permaneceu constante. As Figuras 1 e 2 apresentam a matriz elétrica brasileira nos anos de 2017 e 2018 respectivamente.

Figura 1 - Matriz elétrica brasileira de 2017



Fonte: EPE (2019)

Figura 2 - Matriz elétrica brasileira de 2018



Fonte: EPE (2019)

De acordo com o mesmo relatório síntese da EPE, em 2018 houve uma queda de 8% na geração termelétrica. No ano anterior, a participação das termelétricas na geração de energia elétrica era de 29,7%, já em 2018 a porcentagem diminuiu para 26,7%. Desse total, a biomassa representou 33,9%, o gás natural 34,0%, o carvão 12,7%, a energia nuclear 9,8% e os derivados de petróleo 9,6%.

O incremento da geração através das fontes hídrica, eólica e solar, com a consequente redução da geração termelétrica, reduziu as perdas nos centros de transformação. A Tabela 1 mostra os valores de oferta interna de energia, consumo final e as respectivas perdas dos anos 2017 e 2018:

Tabela 1 - Oferta e consumo de energia no Brasil em 2019

Valores em Mtep	2017	2018
Oferta interna de energia	293,3	288,4
Consumo final	258,4	255,7
Perdas	34,9	32,7
Perdas (%)	11,90%	11,30%

Fonte: EPE (2019)

Em comparação a outros países, o Brasil durante os últimos 45 anos, apresentou matrizes de Oferta Interna de Energia Elétrica com as mesmas tendências mundiais (Tabela 2). Com redução das participações de petróleo e derivados e hidráulica, além do aumento das participações das demais fontes de energia, com exceção do carvão mineral. Enquanto no

Brasil, a tendência de queda na utilização de carvão mineral para geração de energia foi revertida em razão do baixo regime de chuvas a partir de 2011, na Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), o carvão mineral teve sua participação reduzida em 11,1% entre 1973 a 2018 (MME, 2019).

Em relação a matriz elétrica, o Brasil apresenta uma significativa diferença na geração de energia a partir das hidrelétricas: de 66,6% em 2018 contra apenas 12,5% da OCDE, e de 16,7% nos outros países. Outro ponto de destaque é a bioenergia sólida, o país possui 8,5% da sua matriz destinada a essa fonte, enquanto mundialmente ela representa 2,1% da matriz energética de 2018 (MME, 2019).

Tabela 2 - Oferta interna de energia no Brasil e no Mundo (% e tep)

Fonte	Brasil		OCDE		Outros		Mundo	
	1973	2018	1973	2018	1973	2018	1973	2018
Derivados de Petróleo	45,6	34,4	52,6	35,4	29,9	25,8	46,1	31,7
Gás Natural	0,4	12,5	18,9	27,6	12,9	20,9	16,0	22,7
Carvão Mineral	3,2	5,8	22,6	16,6	31,1	34,3	24,6	26,1
Urânio	0	1,4	1,3	9,3	0,2	2,4	0,9	4,9
Hidro	6,1	12,6	2,1	2,2	1,2	2,6	1,8	2,6
Outras não renováveis	0	0,6	0	0,4	0	0,1	0	0,3
Outras Renováveis	44,8	32,6	2,5	8,4	24,7	13,7	10,6	11,7
Bioenergia Sólida	44,3	23,6	2,4	4,6	24,7	11,8	10,5	8,9
Bioenergia Líquida	0,5	7,5	0	1,02	0	0,17	0	0,64
Eólica	0	1,45	0	1,4	0	0,61	0	0,91
Solar	0	0,103	0	0,77	0	0,59	0	0,63
Geotérmica	0	0	0,16	0,64	0	0,53	0,1	0,54
Total (%)	100	100	100	100	100	100	100	100
dos quais renováveis	50,8	45,3	4,6	10,6	26,0	16,3	12,5	14,3
Total-Mtep	82,2	288,4	3741	5385	2105	8109	6109	14175
% do mundo	1,3	2,0	61,2	38,0	34,5	57,2	-	-

Fonte: MME (2019)

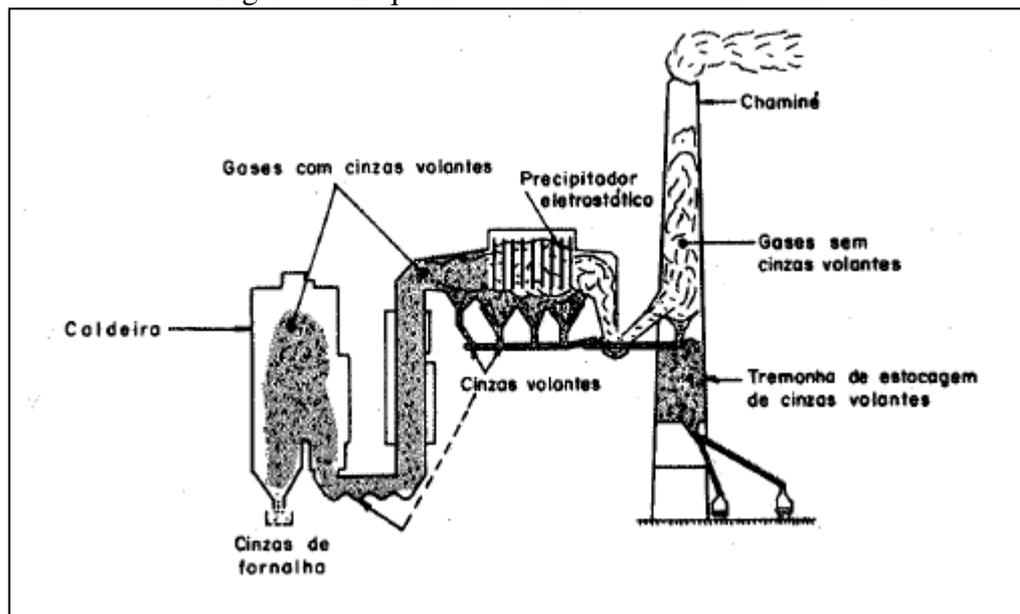
2.3 Cinzas volantes

2.3.1 Definição e Produção

As cinzas volantes, segundo a ACAA (2017), são resíduos finamente divididos gerados a partir da combustão do carvão mineral nas usinas termelétricas para a geração de energia elétrica. Quando o carvão mineral é pulverizado e soprado com ar para dentro das caldeiras, ele se inflama instantaneamente, gerando calor e resíduo mineral fundido. Os tubos da caldeira

extraem o calor, resfriando o gás da combustão e causando a formação das cinzas com o endurecimento do resíduo mineral. Partículas de cinza grossa, referidas como cinza pesadas ou escória, caem para o fundo da câmara de combustão, enquanto as partículas finas, denominadas cinzas volantes, permanecem suspensas no gás de combustão, onde são removidas por dispositivos de controle de emissão de partículas, como os precipitadores eletrostáticos (Figura 3).

Figura 3 - Esquema de combustão de uma termelétrica



Fonte: Jarrige (1971)

2.3.2 Características

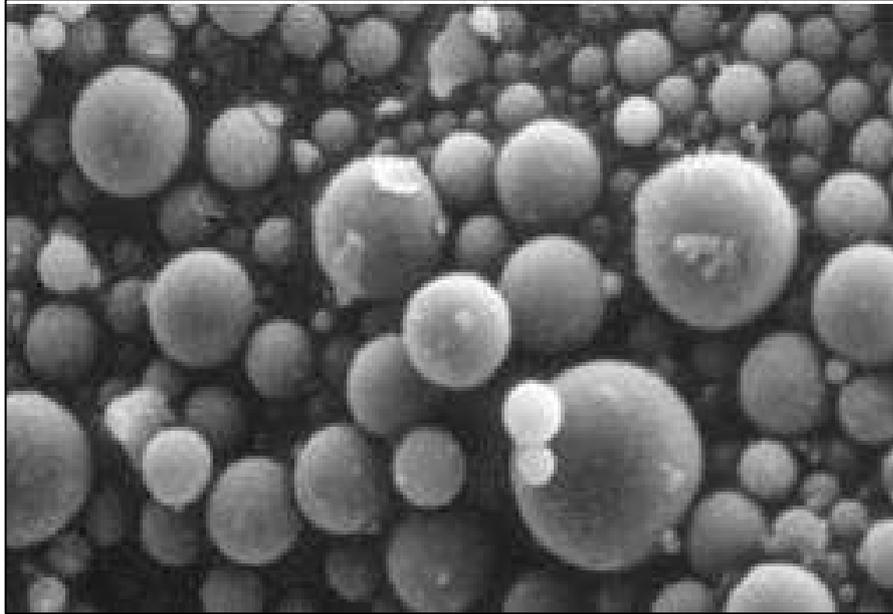
De acordo com Kihara (1983), as cinzas volantes são materiais de difícil estudo, por seus aspectos mineralógicos e estruturais dependerem das condições de combustão e características do carvão mineral utilizado. As cinzas apresentam, assim, características distintas de jazida para jazida. As propriedades das cinzas também são influenciadas pelas técnicas empregadas no armazenamento e manuseamento da mesma (AHMARUZZAMAN, 2010).

2.3.2.1 Propriedades Físicas

Segundo a ACAA (2017), as cinzas volantes são geralmente mais finas que o cimento Portland e a cal. Apresentam forma esférica, podendo ser sólida ou oca (MEHTHA; MONTEIRO, 2014) com diâmetro variando entre 10 e 100 micrômetros (CEZAR, 2011), sendo que cerca de 50% das partículas são menores que 20 μm (ISAIA, 2007). A coloração das cinzas

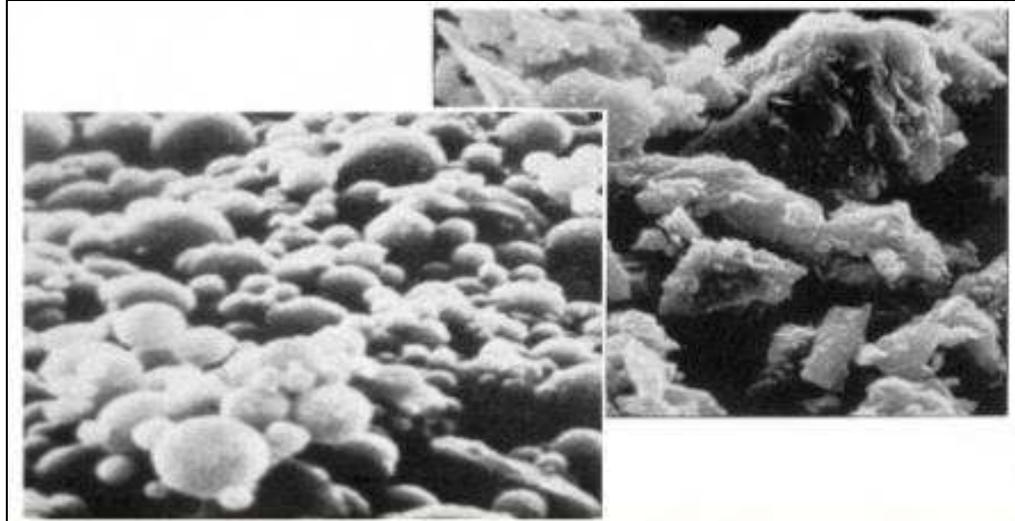
depende do teor de carbono não queimado e pode variar entre cinza e preto (AHMARUZZAMAN, 2010). Tais características podem ser observadas nas Figuras 4 e 5.

Figura 4 - Partículas de cinzas volantes com ampliação de 2.000x



Fonte: ACAA (2017)

Figura 5 - Imagens microscópicas da cinza volante (esquerda) e do cimento (direita)



Fonte: ACAA (2017)

2.3.2.2 Propriedades Químicas

As cinzas volantes são constituídas em sua maior parte por óxidos de silício, ferro e cálcio de alumínio. Estão presentes, em menor grau, magnésio, potássio, sódio, titânio e enxofre (ACAA, 2017). Sushil e Batra (2006) encontraram, ainda, a presença de alguns metais pesados, como Cr, Mn, Pb, Zn, Cu, Ni e Co. Sendo, assim, classificadas conforme a NBR 10004 (2004), em resíduos classe II A – não inerte, ou seja, as cinzas devem ser colocadas em um aterro sanitário para a sua disposição no solo.

A ASTM C 618 (2005) classifica as cinzas volantes de acordo com sua composição química em cinzas de Classe C e de Classe F. A principal diferença entre as classes é a porcentagem presente de compostos de silicato, alumina e óxido de ferro. Enquanto a Classe F apresenta, no mínimo, 70% desses compostos, a Classe C apresenta 50%.

Outro fator de diferenciação, apresentado pela ACAA (2017), é o teor de cálcio. As cinzas da Classe C, normalmente, contêm mais de 20% de CaO, enquanto as de Classe F apresentam menos que 10%. De acordo com Cezar (2011), as cinzas com baixo teor de cálcio são originadas da queima do carvão betuminoso e não apresentam propriedades cimentantes. Já as cinzas da Classe C são provenientes da combustão do carvão sub-betuminoso e do lignito, e por apresentarem alto teor de cálcio possuem propriedades cimentantes em meio aquoso.

2.3.3 Aplicações

Segundo a ACAA (2017), as cinzas volantes podem ser utilizadas na construção de estradas como substituinte parcial do cimento Portland na fabricação de placas de concreto para pavimento rígido e de bloquetes para pavimento intertravado; na estabilização de camadas do pavimento e também na estabilização de solos; como material de empréstimo na construção de aterros; como material de enchimento nas misturas asfálticas a quente. Dwivedi e Jain (2014) mencionam sobre a aplicabilidade das cinzas volantes em outras áreas, como na fabricação de tijolos e de cerâmicas, na fertilização de solos, no desenvolvimento de compósitos de polímeros que podem ser usados como portas, persianas, painéis divisórios, ladrilhos etc.

2.3.3.1 Cinzas volantes no concreto de cimento Portland

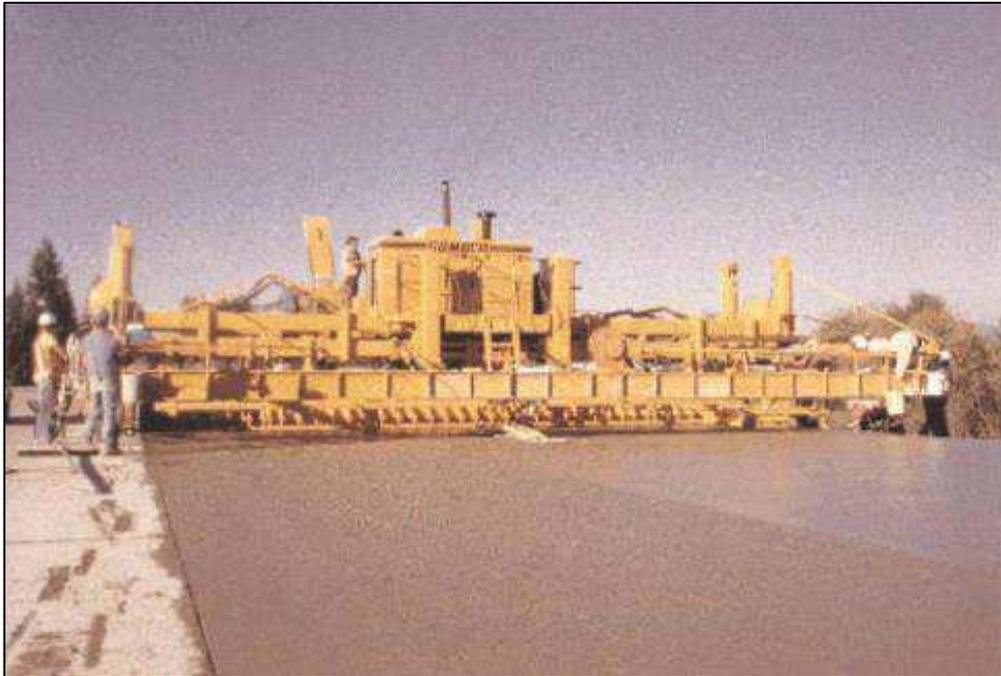
Segundo Patil, Nawle e Kulkarni (2013), as cinzas volantes podem ser adicionadas no concreto de cimento Portland para melhorar o desempenho. Na fabricação do cimento Portland é utilizado óxido de cálcio (CaO), que em alguns casos chega a ser liberado até 9 kg do material em estado livre durante a hidratação de 45 kg de cimento. Essa cal liberada é o ingrediente necessário para reagir com silicatos de cinzas volantes para a produção de compostos de cimentação fortes e duráveis, melhorando assim muitas das propriedades do concreto.

Através de inúmeras pesquisas e projetos de construção de rodovias e pontes, foram demonstrados os diversos benefícios da incorporação de cinzas volantes no concreto de cimento Portland. Tais benefícios variam de acordo com o tipo de cinza, o traço escolhido, os demais materiais utilizados, o procedimento de mistura, as condições de campo e com a concretagem. Alguns dos benefícios da cinza volante no concreto são aumento da resistência, melhor

trabalhabilidade, redução do calor de hidratação, redução da permeabilidade, maior resistência a compostos químicos, redução do custo de produção e aumento da durabilidade (ACAA, 2017).

Alguns cuidados, segundo a ACAA (2017), devem ser tomados ao se usar cinzas volantes no concreto devido ao potencial de redução da capacidade de retenção de ar das cinzas volantes com alto teor de carbono afetar a durabilidade do concreto, à baixa resistência obtida nos primeiros dias e à redução do calor de hidratação em lugares com climas mais frios. Na Figura 6, pode-se observar a execução de um pavimento de concreto com uso de cinza volante.

Figura 6 - Pavimento de concreto com uso de cinza volante



Fonte: ACAA (2017)

2.3.3.2 Cinzas volantes na estabilização da camada de base do pavimento

As camadas de base estabilizadas com cinzas volantes são misturas de cinzas, agregados e, se necessário, cimento ou cal, que quando devidamente compactadas, melhoram a resistência e a durabilidade da camada (Figura 7). A possibilidade do uso de materiais disponíveis na região da obra, custos mais baixos, cura autógena, aumento da eficiência energética e possibilidade de uso de agregados reciclados são outras vantagens da estabilização da base com cinzas volantes (ACAA, 2017).

Para conseguir tais benefícios, deve-se ter cuidado ao misturar cinzas volantes que apresentam teor de SO_3 acima de 5%, avaliando o seu potencial de mistura com o solo a ser

melhorado. Em regiões com variações extremas de clima, são necessárias várias semanas de clima quente para a base estabilizada com cinza adquirir força suficiente para ser capaz de resistir ao ciclo de gelo-degelo do primeiro inverno. Além de evitar a circulação de veículos antes do tempo requerido para a cura (ACAA, 2017).

Figura 7 - Recuperação da camada de pavimento utilizando cinzas volantes



Fonte: ACAA (2017)

2.3.3.3 Cinzas volantes na estabilização de solos

A estabilização do solo é a alteração física e química permanente dos solos para melhorar suas propriedades físicas. A estabilização pode aumentar a resistência ao cisalhamento de um solo e/ou controlar as propriedades de contração e inchamento de um solo, melhorando assim a capacidade de carga de uma subclasse para apoiar pavimentos e fundações. A estabilização pode ser usada para tratar uma ampla gama de materiais de subclasse, de argilas expansivas a materiais granulares. A estabilização pode ser alcançada com uma variedade de aditivos químicos, incluindo cal, cinzas volantes e cimento Portland (PATIL; NAWLE; KULKARNI, 2013, p. 1660, tradução nossa).

Solos estabilizados podem ter acréscimo nos valores de resistência, redução de plasticidade e baixa permeabilidade. Além de proporcionar a redução da espessura do pavimento e a eliminação da necessidade de escavações, transporte e manuseios de materiais mais caros (PATIL; NAWLE; KULKARNI, 2013).

Alguns cuidados ao se utilizar as cinzas para estabilização de solos devem ser tomados, como realização de testes de lixiviação, checagem do teor de umidade do solo no momento da compactação e verificação dos componentes químicos, já que cinzas que apresentam teor de sulfato acima de 10% podem causar expansão além da desejada. (ACAA, 2017).

A Figura 8 apresenta a execução de um serviço de mistura e modelagem do solo que foi estabilizado com cinza volante.

Figura 8 - Mistura e modelagem de solo estabilizado com cinzas volantes



Fonte: ACAA (2017)

2.3.3.4 Cinza volante em misturas asfálticas a quente

Apesar dos fileres, geralmente, representarem menos de 8% da composição das misturas asfálticas a quente em massa, as interações dos materiais de enchimento com o ligante e/ou com os agregados graúdos e miúdos afetam o desempenho do revestimento. Além disso, o uso de cinzas volantes nos revestimentos a quente mostrou que ele não se comporta de maneira semelhante aos enchimentos típicos. (REMME *et al.*, 2016, p. 2, tradução nossa).

As cinzas volantes podem ser usadas como fíler em misturas asfálticas a quente. Os benefícios da utilização das cinzas volantes incluem: redução do surgimento de panelas graças as suas propriedades hidrofóbicas e também devido à presença de cal em maior porcentagem em algumas cinzas; custo menor do que outros enchimentos minerais; além de possibilitar melhor trabalhabilidade, facilitar a compactação, retardar o envelhecimento do ligante, aliviar as tensões térmicas e reduzir as fissuras devido a variação de temperatura (REMME *et al.*, 2016) e (ACAA, 2017).

Na Figura 9, pode-se observar a execução de um pavimento asfáltico, tipo SMA, utilizando cinza volante:

Figura 9 - Stone Matrix Asphalt com cinzas volantes



Fonte: ACAA (2017)

2.4 Pavimento

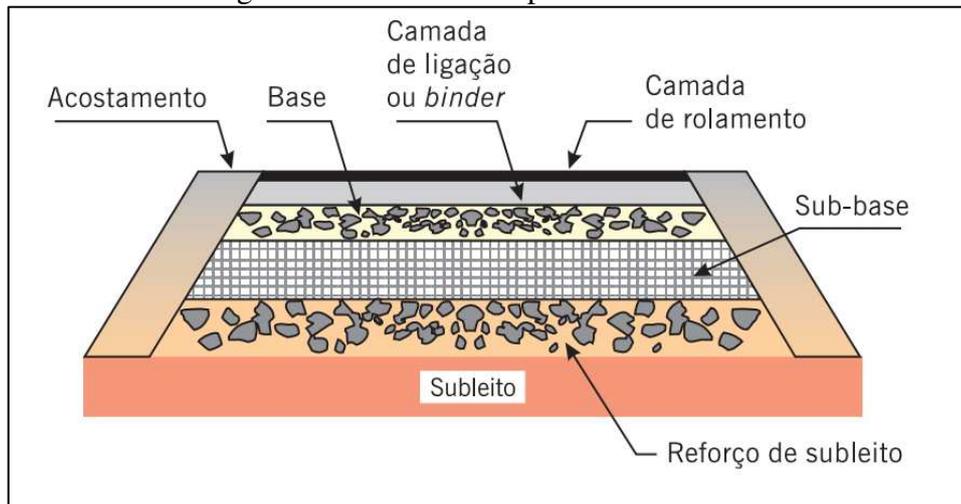
2.4.1 Definição

Pavimento rodoviário, segundo o DNIT (2006), é a superestrutura formada por camadas de espessuras finitas, em que materiais de diferentes resistências e deformabilidades são justapostos resultando em uma estrutura capaz de resistir as tensões e deformações resultantes das cargas impostas pelo tráfego. Bernucci *et al.* (2006) atribuem, ainda, ao pavimento as funções de propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança.

2.4.2 Classificação

Os pavimentos são classificados em flexíveis, rígidos e semirrígidos. O pavimento flexível (Figura 10) é construído por um revestimento betuminoso sobre camadas granulares que sofrem deformações elásticas aproximadamente equivalentes por conta do carregamento aplicado. Já o pavimento rígido (Figura 11) é revestido por placas de concreto de cimento Portland, que absorvem praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado, por apresentar uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores. Por fim, o pavimento semirrígido é caracterizado por um revestimento asfáltico sobre uma base cimentada (MEDINA, 2005) e (DNIT, 2006).

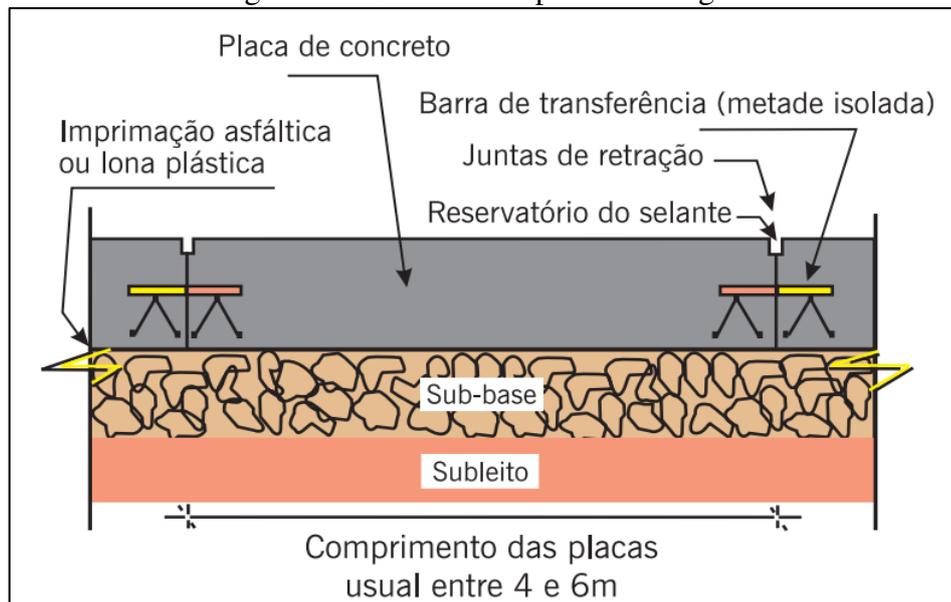
Figura 10 - Estrutura do pavimento flexível



Fonte: Bernucci *et al.* (2006)

De acordo com a CNT (2017), as camadas do pavimento flexível são mais espessas a fim de proteger o subleito, já que existe um campo de tensões muito concentrado nas proximidades de aplicação da carga decorrente do tráfego.

Figura 11 - Estrutura do pavimento rígido



Fonte: Bernucci *et al.* (2006)

Ainda segundo a CNT (2017), os pavimentos rígidos distribuem as tensões provenientes do tráfego em uma grande área e de maneira semelhante em toda a dimensão da placa. Por isso esse tipo de pavimento é pouco deformável e constituído, principalmente, por concreto de cimento Portland.

A Tabela 3 apresenta as principais diferenças entre os dois tipos usuais de pavimento:

Tabela 3 - Comparativo entre pavimentos flexíveis e rígidos

	Pavimentos flexíveis	Pavimentos rígidos
Investimento inicial	Varia de acordo com os materiais utilizados e os valores dos insumos por região	Assim como os pavimentos flexíveis, o investimento inicial também varia, mas se considera que esse valor seja em média 30% maior em relação ao pavimento flexível
Vida útil (com manutenção)	8 a 12 anos	25 a 30 anos
Manutenção	Manutenção frequente e mais complexa	Pouca necessidade de manutenção e ações mais simples
Espessura/estruturação	Estrutura mais espessa com camadas múltiplas	Menos camadas, consequentemente menor espessura
Distribuição das tensões	A carga é distribuída a todas as camadas, que sofrem deformações elásticas significativas	Placa absorve a maior parte das tensões e as distribui sobre uma área relativamente maior
Materiais utilizados	O asfalto é derivado do petróleo, normalmente misturado a quente, consumindo combustível	O concreto é feito de materiais locais, misturado a frio, consumindo, geralmente, energia elétrica
Reação com produtos químicos	Suscetíveis a alterações químicas irreversíveis	Pouco suscetíveis a reações químicas e à contaminação
Aderência das demarcações (sinalização horizontal)	De textura mais rugosa, apresenta melhor aderência das demarcações da pista	Devido ao seu baixo índice de porosidade, apresenta baixa aderência das demarcações
Difusão de luz	Menor índice de reflexão de luz	Coloração clara, apresentando melhor capacidade de difusão de luz (refletividade)
Drenagem	Absorve a umidade com rapidez e, por sua textura superficial, retém a água, o que requer maiores caimentos (inclinação lateral)	Melhores características de drenagem superficial: escoamento melhor a água superficial
Segurança quanto à derrapagem	Superfície escorregadia quando molhada	Fornecer boa aderência do pneu, devido à textura dada a superfície

Fonte: CNT (2017)

2.4.3 Estrutura do pavimento

De acordo com a CNT (2017), uma seção transversal típica do pavimento é composta por:

- subleito – terreno de fundação constituído de material natural consolidado e compactado em que o pavimento é apoiado. É responsável por absorver definitivamente os esforços verticais causados pelo tráfego, e deve ser estudado até a profundidade onde essas cargas são significativas, entre 0,60 e 1,40 metro. O subleito deve ser regularizado, ou seja, receber uma faixa de nivelamento, com a finalidade de conformá-lo transversal e longitudinalmente.
- reforço do subleito – camada de espessura transversal constante e espessura longitudinal variável de acordo com o dimensionamento do pavimento. O reforço é necessário no caso de estruturas espessas, provenientes da fundação de baixa qualidade, tráfego de cargas muito pesadas ou combinação desses fatores. Em relação ao material utilizado nessa camada, deve ser atendida as condições mínimas de qualidade especificadas pelo DNIT, possuindo CBR superior ao material do subleito e inferior ao material da camada superior.
- sub-base – camada que exerce a função de complemento da base, e é executada por circunstâncias técnico-econômicas, quando a camada de base exigida for muito espessa. Além de possuir a função de resistir e distribuir os esforços verticais provenientes da ação do tráfego, a camada ainda tem a função de drenar infiltrações e controlar a ascensão capilar da água. Nessa camada, é empregado material que possui características tecnológicas superiores às do material de reforço e inferiores às do material da base.
- base – camada destinada a resistir e distribuir para as camadas inferiores os esforços verticais provenientes do tráfego, e é sobre a base que é construído o revestimento. Os materiais aqui utilizados podem ser os mesmos listados para a sub-base, mas com melhores características tecnológicas.
- revestimento – camada, tanto quando possível impermeável, que recebe diretamente a ação do tráfego, e tem o objetivo de melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e à segurança. Nessa camada podem ser empregados: pedras cortadas justapostas, paralelepípedos, blocos pré-moldados de concreto, placas de concreto, tratamentos superficiais betuminosos e misturas asfálticas.

2.5 Misturas asfálticas a quente

2.5.1 Generalidades

A mistura asfáltica a quente consiste na combinação de agregado uniformemente misturado e recoberto com asfalto. A fim de secar o agregado e conseguir fluidez suficiente do cimento asfáltico para uma boa mistura e trabalhabilidade, tanto o agregado como o asfalto devem ser aquecidos previamente à mistura – daí o nome de mistura asfáltica a quente (INSTITUTO DE ASFALTO, 1989).

Como mencionado anteriormente, o revestimento de mistura a quente é constituído de dois ingredientes principais: aglutinante e agregado. O ligante asfáltico é normalmente o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), obtido a partir da refinação do petróleo bruto, já os agregados são combinações de materiais grossos e finos, com fíler mineral se necessário. A proporção correta de cimento asfáltico e agregados necessários para produzir uma mistura asfáltica, com propriedades e características para suportar os efeitos do tráfego e do clima por muitos anos, é obtida a partir do sistema de projeto e métodos de dosagem (AASHTO, 1991).

2.5.2 Classificação

Segundo Bernucci *et al.* (2006), as misturas asfálticas a quente são divididas, usualmente, pela graduação dos agregados e fíler em (Figura 12):

- Graduação densa: quando a curva granulométrica é contínua e bem-graduada, proporcionando um esqueleto mineral com poucos vazios, já que os agregados de dimensões maiores são preenchidos pelos agregados miúdos. O Concreto Asfáltico (CA) é um exemplo de mistura asfáltica a quente de graduação densa.
- Graduação aberta: quando a curva granulométrica é uniforme, apresentando agregados quase exclusivamente de um mesmo tamanho. Dessa forma, o esqueleto mineral apresenta muitos vazios interconectados, possibilitando a percolação de água no interior da mistura asfáltica. A mistura asfáltica drenante ou Camada Porosa de Atrito (CPA) é um exemplo de mistura asfáltica a quente de graduação aberta.
- Graduação descontínua: quando a curva granulométrica apresenta grãos graúdos em quantidade dominante em relação aos grãos de dimensões intermediárias, com pouca quantidade de finos, a fim de possibilitar o maior número de contatos entre os agregados graúdos e assim tornar o esqueleto mineral mais resistente à deformação permanente. A matriz pétreo asfáltica (Stone Matrix Asphalt – SMA) é um tipo de mistura asfáltica a quente de graduação descontínua.

Figura 12 - Composições granulométricas dos tipos de misturas a quente



(a) Aberta

(b) Descontínua

(c) Densa

Fonte: Bernucci *et al.* (2006)

2.5.3 Concreto asfáltico

O concreto asfáltico denso é a mistura asfáltica usinada a quente mais utilizada como revestimentos de pavimentos no Brasil (Bernucci *et al.*, 2006). De acordo com a norma DNIT 031/2006 - ES, o concreto asfáltico é uma mistura realizada em usina com características específicas, composta de agregado graduado, fíler quando necessário e cimento asfáltico de petróleo, espalhada e compactada a quente. A mistura pode ser empregada como revestimento, camada de ligação, base, regularização ou reforço de pavimento.

Os componentes do concreto asfáltico devem satisfazer às normas pertinentes e às especificações do DNIT 031/2006 - ES. Quanto ao cimento asfáltico podem ser utilizados os CAP-30/45, CAP-50/70 e CAP-85/100. O agregado graúdo pode ser pedra britada, escória e seixo rolado, que tenham desgaste Los Angeles igual ou inferior a 50%, índice de forma superior a 0,5 e durabilidade com perda inferior a 12%. Em relação ao agregado miúdo podem ser utilizados areia e pó-de-brita ou mistura de ambos, que apresentem equivalente de areia igual ou superior a 55%. Já como material de enchimento podem ser utilizados cimento Portland, cal extinta, pós-calcários e cinza volante, que devem estar secos e isentos de grumos (DNIT, 2006). Esse tipo de mistura asfáltica será mais abordado nos próximos itens por ser objeto de estudo dessa pesquisa.

2.5.4 Propriedades dos agregados

De acordo com a AASHTO (1991), as seguintes propriedades dos agregados terão efeitos no resultado da mistura asfáltica:

- forma – o agregado arredondado é deslocado por uma carga aplicada mais facilmente, enquanto o agregado angular apresenta um maior grau de

intertravamento. As misturas de agregados triturados exigem um esforço maior de compactação para obter o nível de densidade necessário do que as misturas que contém cascalho arredondado. Além disso, um agregado que possui área superficial maior exige uma quantidade maior de ligante asfáltico para obter uma determinada espessura de filme ao redor das partículas.

- textura – quanto mais suave for a textura da superfície da partícula do agregado, maior é a sua tendência a ser macia sob o esforço de compactação. Uma mistura que contém agregados com textura áspera, semelhante à partícula de um agregado com forma angular, geralmente exige um esforço maior de compactação para preencher uma determinada porcentagem de vazio.
- dimensão máxima das partículas – normalmente quanto maior o tamanho máximo do agregado em relação a espessura da camada de revestimento e quanto maior a quantidade de agregado graúdo na mistura, mais difícil é compactar a mistura. Além disso, se a dimensão máxima das partículas do agregado ultrapassar metade da espessura compactada do pavimento, a textura da mistura pode ser afetada e o grau de densidade obtido na mistura pelo equipamento de compactação pode ser reduzido.
- absorção – a quantidade de ligante asfáltico que é absorvido pelo agregado também pode interferir no resultado das propriedades da mistura asfáltica. Se as partículas dos agregados tiverem alto teor de absorção, o teor de ligante na mistura deve ser aumentado para compensar a parte que é absorvida e que, assim, não ajuda a recobrir a superfície das partículas dos agregados. Caso a correção da quantidade de asfalto não seja realizada, a mistura poderá ser seca e rígida.
- índice de vazios – os vazios no agregado mineral de uma mistura (VAM) são definidos como o volume do espaço vazio entre as partículas dos agregados, que inclui os vazios do ar e o conteúdo efetivo de ligante asfáltico, expresso em relação ao volume total da amostra. Uma mistura com baixo conteúdo de VAM é muito sensível ao teor total de líquidos, ou seja, teor de cimento asfáltico e qualquer umidade na mistura. Sob a ação do tráfego, as misturas asfálticas se deformam significativamente por fluência se o teor de ligante for alto, e têm sua resistência à tração afetada se o teor de ligante for baixo.
- porcentagem de material passante na peneira de N° 200 - A quantidade de material que passa na peneira N° 200 pode ter um efeito variável na capacidade de compactar

uma mistura. À medida que a quantidade de agregado que passa na peneira nº 200 aumenta, a trabalhabilidade da mistura de agregados cresce, até um certo ponto. Depois desse limite, à medida que a quantidade de agregado que passa na peneira nº 200 aumenta, a rigidez da mistura aumenta.

2.6 Fíler mineral

A norma DNER-EM 367/97 define fíler ou material de enchimento como material mineral inerte em relação aos demais constituintes da mistura asfáltica, finamente dividido, passante pelo menos 65% na peneira de 0,075 mm de abertura quadrada.

Para Anderson e Goetz (1973, apud TAYL; JABR, 2011), o fíler tem papel importante no comportamento das misturas asfálticas, não apenas por preencher os vazios entre os agregados graúdos nas misturas, mas também por alterar as propriedades dos ligantes asfálticos atuando como parte ativa do mástique, que é a combinação de ligante asfáltico, fíler e ar.

Segundo Kim *et al.* (2003; apud BARDINI *et al.*, 2012), as propriedades do mástique afetam o comportamento mecânico, reológico, térmico e de sensibilidade à água. Além disso, a rigidez do mástique influencia o resultado da mistura asfáltica quanto a resistência à deformação permanente a altas temperaturas, as tensões desenvolvidas e a resistência ao trincamento a baixas temperaturas.

Heukelon (1965, apud TAYL; JABR, 2011) realizou um estudo onde mostrou que a quantidade de fíler usado na mistura asfáltica pode influenciar o grau de compactação da mistura. Para um determinado tipo de fíler, a facilidade de compactação aumenta com a porcentagem de fíler contido no revestimento. O aumento da quantidade de fíler na mistura, ainda, reduz o teor ideal de ligante, aumenta a densidade e estabilidade do revestimento.

Os fíleres devem ser misturados com os demais constituintes de forma consistente e em proporções corretas para que as propriedades da mistura não sejam afetadas adversamente. Quantidades excessivas de material de enchimento, geralmente, reduzem os vazios no agregado mineral (VAM) a um ponto em que a quantidade necessária de ligante asfáltico para produção de uma mistura durável não possa ser adicionado. O alto teor de fíler também aumenta a área superfície do agregado e, portanto, reduz bastante a espessura do filme de asfalto (FREDDY, 1996 apud TAYL; JABR, 2011).

Além disso, as características do fíler variam com a sua graduação. Craus *et al.* (1978 apud BARDINI, 2013) consideram que o material de enchimento apresenta dois caminhos de atuação nas misturas asfálticas de acordo com o seu tamanho: as partículas maiores do fíler constituem o agregado mineral e, assim, preenchem os vazios interstícios dos agregados graúdos, tornando as misturas mais resistentes; já as partículas menores se combinam com o ligante asfáltico, aumentando a sua consistência e cimentando as partículas maiores.

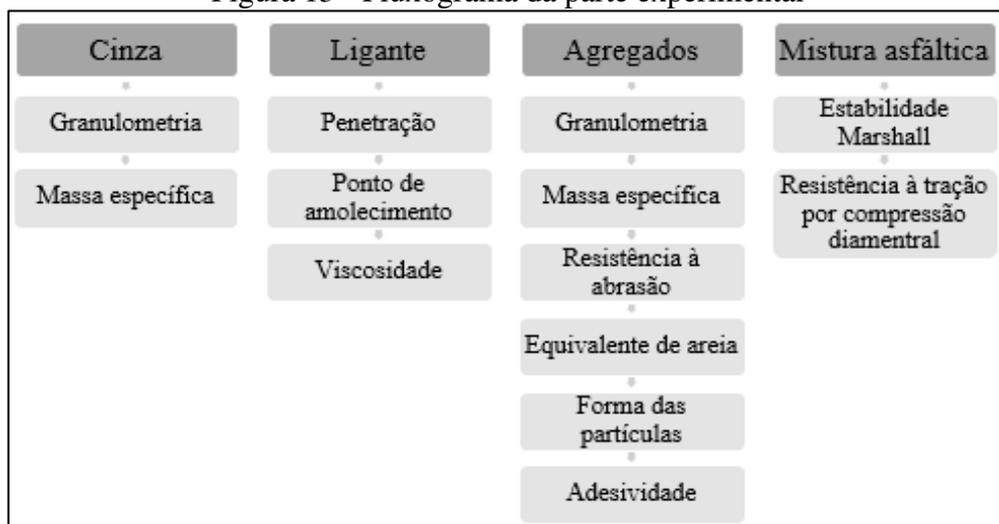
O mecanismo químico do fíler mineral também deve ser levado em consideração. Graças a composição química, o material de enchimento pode funcionar com material ativo na mistura asfáltica. Tal característica pode se manifestar na interação entre partículas ativas de fíler e ligante asfáltico, afetando fortemente as propriedades reológicas de alta temperatura em certos ligantes asfálticos compatíveis em um grau muito mais alto do que com enchimentos inertes (LIAO; AIREY; CHEN; 2013). Já em baixas temperaturas, segundo Bahia (1995 apud BARDINI *et al.*, 2012), os efeitos reológicos da adição do fíler ativo são desfavoráveis. O fíler por ser constituído de partículas bem mais rígidas que as do ligante, aumenta a rigidez do ligante asfáltico, reduzindo assim a capacidade de relaxar tensões.

3 METODOLOGIA

A parte inicial do estudo contempla uma pesquisa bibliográfica para embasar os conceitos necessários ao tema proposto. Em seguida, tem-se o estudo experimental que consiste na caracterização física da cinza volante por meio dos ensaios de granulometria (DNER-ME 083/98) e massa específica (DNER-ME 085/94); na caracterização dos agregados a partir de ensaios físicos para obtenção da graduação (DNER-ME 083/98), equivalente de areia (DNER-ME 054/97), resistência à abrasão (DNER-ME 035/98), forma das partículas (ABNT NBR 6954:1989; ABNT NBR 7809:2005), adesividade (DNER-ME 078/94) e massa específica (DNER-ME 194/98; DNER-ME 195/97); na determinação das propriedades físicas do ligante quanto à penetração (DNIT 155/2010-ME), viscosidade (ABNT NBR 14950:2003) e ponto de amolecimento (DNIT 131/2010 – ME).

Posteriormente, serão moldados corpos de prova de mistura asfáltica do tipo CAUQ utilizando cinza volante como filler com diferentes teores de ligantes para determinação do teor de projeto por meio do método Marshall, e das características mecânicas da mistura por meio dos ensaios de estabilidade Marshall (DNER – ME 043/95) e resistência à tração por compressão diametral (DNIT 136/2010 - ME). Para melhor entendimento, apresenta-se na Figura 13 o fluxograma representando a metodologia adotada na parte experimental da pesquisa.

Figura 13 - Fluxograma da parte experimental



Fonte: Autor (2019)

Para comparação de resultados, serão utilizados os trabalhos realizados por Mistry e Roy (2016) sobre o uso de cinzas volantes como substituto do filler comum nas misturas asfálticas a quente do tipo SMA, e a pesquisa de Bohara e Tamrakar (2018) que consistiu na adição de cinzas volantes nas misturas asfálticas do tipo concreto asfáltico.

3.1 Materiais

O concreto asfáltico é composto por agregados graduados, filler e ligante. Para a produção da mistura estudada nesse trabalho, serão utilizados os seguintes materiais:

- agregados: brita 1, brita 0, pó de brita e areia cedidos pela prefeitura do Campus Paulo VI da Universidade Estadual do Maranhão e por empresas locais (Figura 14);
- cinza volante, originada da combustão do carvão mineral da termelétrica do Porto do Itaqui, pertencente ao grupo ENEVA (Figura 15);
- cimento CP IV – 32 RS concedido pelo Laboratório de Concreto da Universidade Estadual do Maranhão (Figura 15);
- ligante asfáltico: CAP cedido pela empresa Maranhão Asfaltos (Figura 16).

Figura 14 - Agregados



Fonte: Autor (2019)

Figura 15 - Materiais de enchimento: cinza volante (à esquerda) e cimento (à direita)



Fonte: Autor (2019)

Figura 16 - CAP 50/70



Fonte: Autor (2019)

3.2 Ensaios de caracterização

3.2.1 Ensaios de caracterização dos agregados

3.2.1.1 Análise granulométrica

A norma DNER-ME 083/98 prescreve o procedimento para determinação da composição granulométrica de agregados graúdos e miúdos por peneiramento. Através da porcentagem passante acumulada em cada peneira obtida pelo ensaio, é então possível enquadrar os materiais em uma das faixas apresentada pela norma DNIT 031/2006 -ES (Tabela 4).

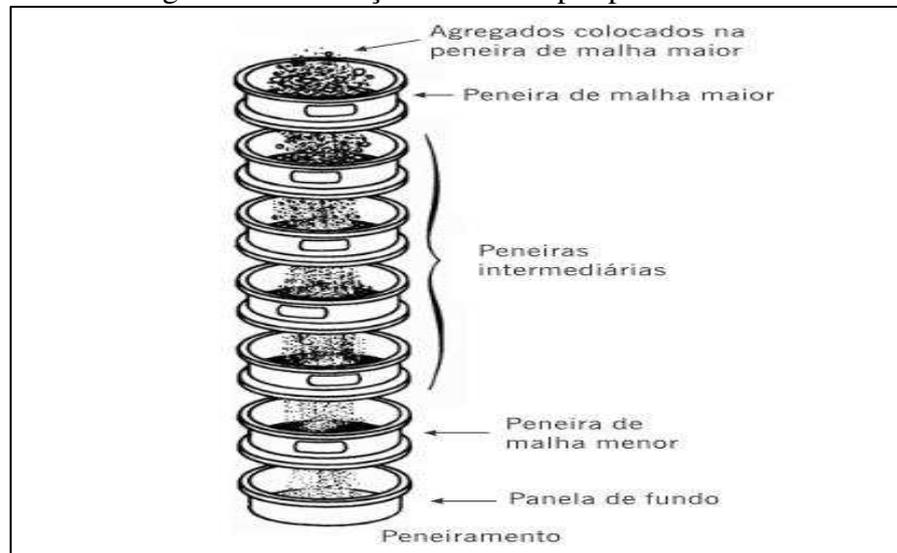
Tabela 4 - Faixas do DNIT para concreto asfáltico

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

Fonte: DNIT (2006)

Para a realização do ensaio, as amostras de materiais foram coletadas, reduzidas a valores recomendados pela norma e secadas em estufa a uma temperatura de 110 ± 5 °C. Em seguida, as peneiras foram encaixadas, formando um único conjunto de peneiras, com abertura de malha em ordem crescente da base para topo, com um fundo (Figura 17).

Figura 17 - Ilustração da análise por peneiramento



Fonte: Bernucci *et al.* (2006)

O peneiramento da brita 1, da brita 0, do pó de brita e da areia aconteceu separadamente com quantidades da amostra de, respectivamente, 7, 5, 1 e 1 kg atendendo a recomendação da norma DNER-ME 083/98 (Tabela 5). O material foi colocado por partes sobre o conjunto de peneiras, evitando a formação de camada espessa de material sobre qualquer uma das peneiras. Por fim, a agitação das peneiras foi feita em movimentos laterais e circulares alternados nos planos horizontal, vertical e inclinados.

Tabela 5 - 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: DNER (1998)

3.2.1.2 Massa específica

A massa específica dos agregados miúdos foi encontrada por meio do frasco Chapman conforme a norma DNER-ME 194/98. Da amostra, previamente seca em estufa até constância de massa, foram introduzidos, cuidadosamente, 500g de materiais no frasco com água destilada (Figura 18) até a marca de 200 cm³, que em seguida foi devidamente agitado para eliminação das bolhas de ar. Por fim, foi realizada a leitura do nível atingindo pela água no gargalo do frasco.

$$\gamma = \frac{500}{L - 200}$$

Onde:

γ – massa específica do agregado miúdo, expressa em g/cm³;

L – leitura no frasco (volume ocupado pelo conjunto água-agregado miúdo)

Figura 18 - Frasco Chapman



Fonte: Autor (2019)

Figura 19 - Pesagem do agregado graúdo



Fonte: Autor (2019)

Já a determinação da massa específica dos agregados graúdos é prescrita pela norma DNER-ME 195/97. Foram pesadas inicialmente, cerca de 3,0 kg de brita 1 e 2,0 kg de brita 0 conforme especificado na Tabela 6.

Tabela 6 - Massa mínima de amostra de ensaio (massa específica)

Dimensão máxima caracterís do agregado (mm)	Massa mínima Da amostra de ensaio (kg)
12,5 ou menor	2
19	3
25	4
38	5
50	8
64	12
76	18
100	40
125	75
152	125

Fonte: DNER (1998)

As amostras de cada agregado foram, então, lavadas separadamente sobre a peneira 4,8 mm e levadas à estufa para secagem até constância da massa, à temperatura entre 105°C e 110°C. Posteriormente, o agregado foi imerso em água, à temperatura ambiente, por um período de (24 ± 4) h. Passado o tempo necessário, as amostras de brita 0 e brita 1 foram retiradas da água e enxugadas com um pano absorvente até que as películas visíveis de água fossem eliminadas. Após, a secagem, foram determinadas as massas de cada amostra na condição saturada superfície seca.

Em seguida, o material foi posto no recipiente para amostra e emergido no balde cheio de água, conforme a Figura 19. A leitura do agregado imerso em água é feita e, por fim, é realizado uma última leitura correspondente a massa do agregado seco, após a amostra ser seca em estufa até constância de massa. A massa específica na condição seca é dada pela seguinte fórmula:

$$\gamma_s = \frac{A}{B - C}$$

Onde:

γ_s – massa específica do agregado na condição seca, em kg/dm^3 ou em g/cm^3 ;

A – massa do agregado seco, em kg ou g;

B – massa do agregado na condição saturada superfície seca, em kg ou em g;

C – leitura correspondente ao agregado imerso em água, em kg ou g.

Sendo que o valor da diferença entre B e C é igual ao volume do agregado, aplicado na fórmula acima, em dm^3 ou cm^3 .

Já a absorção do agregado graúdo é obtida pela expressão:

$$a = \frac{B - A}{A} \times 100$$

Onde:

a – absorção do agregado, em porcentagem.

3.2.1.3 Resistência à abrasão

Segundo a norma DNER-ME 035/98, abrasão “Los Angeles” de agregado é:

Desgaste sofrido pelo agregado, quando colocado na máquina “Los Angeles” juntamente com uma carga abrasiva, submetido a um determinado número de revoluções desta máquina à velocidade de 30 rpm a 33 rpm. O desgaste é convencionalmente expresso pela porcentagem, em peso, do material que passa, após o ensaio, pela peneira de malhas quadradas de 1,7 mm (DNER, 1998, p.2).

As graduações das amostras foram selecionadas de acordo com a Tabela 7. O ensaio está ligado a granulometria do material ensaiado, e por isso a graduação escolhida deve ser aquela mais próxima possível da que será usada para confecção dos corpos de prova. A brita 1 foi enquadrada na graduação B, enquanto a brita 0 na graduação C.

Tabela 7 - Graduação para ensaio de abrasão “Los Angeles”

Peneiras Abertura em mm		Amostra - massa parcial em gramas						
Passando em	Retido em	Grad. A	Grad. B	Grad. C	Grad. D	Grad. E	Grad. F	Grad. G
76	63	-	-	-	-	2500 ± 50	-	-
63	50	-	-	-	-	2500 ± 50	-	-
50	38	-	-	-	-	2500 ± 50	5000 ± 50	-
38	25	1250 ± 25	-	-	-	-	5000 ± 25	5000 ± 25
25	19	1250 ± 25	-	-	-	-	-	5000 ± 25
19	12,5	1250 ± 10	2500 ± 10	-	-	-	-	-
12,5	9,5	1250 ± 10	2500 ± 10	-	-	-	-	-
9,5	6,3	-	-	2500 ± 10	-	-	-	-
6,3	4,8	-	-	2500 ± 10	-	-	-	-
4,8	2,4	-	-	-	5000 ± 10	-	-	-
Massas totais em gramas		5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	10000 ± 100	10000 ± 75	10000 ± 50

Fonte: DNER (1998)

A amostra é lavada e seca em estufa, à temperatura entre 105°C e 110°C, até ser verificada a constância de massa. Depois de seca, peneira-se o material e separam-se as diferentes porções retiradas nas diferentes peneiras para fornecer a amostra da graduação escolhida. Posteriormente, as diversas porções da mesma graduação são misturadas e pesadas, obtendo assim a massa da amostra seca antes do ensaio.

A carga abrasiva, a ser usada no ensaio, foi definida de acordo com a Tabela 8:

Tabela 8 - Carga abrasiva

Graduação	Número de esferas	Massa de carga (g)
A	12	5.000 ± 25
B	11	4.584 ± 25
C	8	3.330 ± 20
D	6	2.500 ± 15
E	12	5.000 ± 25
F	12	5.000 ± 25
G	12	5.000 ± 25

Fonte: DNER (1998)

Logo, para amostra de brita 1 foram utilizadas 11 esferas de aproximadamente 4.584 g, enquanto para brita 0 foram usadas 8 esferas com cerca de 3.300 g. Após determinadas a amostra e a respectiva carga abrasiva, o conjunto é colocado no tambor (Figura 20) que é girado com velocidade de 30 a 33 rpm até completar 500 rotações.

Terminado o ciclo de rotações, o material é retirado do tambor (Figura 21) e lavado na peneira 1,7 mm. O material passante na peneira é descartado, e o material retido é seco em estufa à temperatura entre 105°C e 110°C, durante, pelo menos 3 horas. Por fim, determina-se a massa do material seco retido na peneira 1,7 mm.

Figura 20 - Máquina abrasiva "Los Angeles"



Fonte: Autor (2019)

Figura 21 - Amostra após o ensaio de abrasão



Fonte: Autor (2019)

A abrasão “Los Angeles” do agregado é calculada pela fórmula abaixo:

$$A_n = \frac{m_n - m'_n}{m_n} \times 100$$

Onde:

A_n – abrasão “Los Angeles” da graduação n, com aproximação de 1%;

n – graduação (A, B, C, D, E, F ou G) escolhida para o ensaio;

m_n – massa total da amostra seca, colocada na máquina;

m'_n – massa da amostra lavada e seca, após o ensaio (retida na peneira de 1,7 mm).

3.2.1.4 Equivalente de areia

De acordo com a norma DNER-ME 054/97, equivalente de areia é:

Relação volumétrica que corresponde à razão entre a altura do nível superior da areia e a altura do nível superior da suspensão argilosa de uma determinada quantidade de solo ou de agregado miúdo, numa proveta, em condições estabelecidas neste Método (DNER, 1997, p.2).

A amostra de agregado miúdo é obtida com o material úmido que passa na peneira de 4,8 mm, e a solução empregada no ensaio (Figura 22) é produzida diluindo 125 ml de solução concentrada em água destilada até completar o volume de 5 litros.

A solução concentrada é preparada da seguinte forma:

- dissolver 557 g de cloreto de cálcio em 2 litros de água destilada;
- agitar energeticamente a solução;
- esfriá-la e filtrá-la utilizando papel-filtro;
- adicionar 2510 g de glicerina a 57,5 g de solução de formaldeído;
- agitar bem;
- completar o volume de 5 litros de solução a água destilada à solução concentrada água destilada.

Figura 22 - Solução de trabalho



Fonte: Autor (2019)

Figura 23 - Proveta



Fonte: Autor (2019)

Figura 24 - Sedimentação da amostra



Fonte: Autor (2019)

Figura 25 - Pistão colocado na proveta



Fonte: Autor (2019)

Após a solução de trabalho ser preparada, ela é sifonada para a proveta, até atingir o traço de referência a 10 cm da base, como mostrada na Figura 23. Logo em seguida, adicionar também a amostra com cerca de 110 g de material solto (Figura 24). É importante bater o fundo da proveta firmemente com a palma da mão várias vezes para deslocar as bolhas de ar e ajudar a molhar a amostra. Deixar, a seguir, a proveta em repouso durante 10 minutos.

Passado o tempo de repouso, a proveta é tampada com a rolha de borracha e agitada horizontalmente. Executam-se 90 ciclos em cerca de 30 segundos, com deslocamento em torno de 20 cm. Após esse processo, a proveta é destampada e lavada com a solução de trabalho até o líquido atingir o círculo de referência superior da proveta, que está a 38 cm da base. Deixar a seguir, a proveta em repouso por 20 minutos sem perturbação.

Após o período de 20 minutos, quando o material já se encontra sedimentado, é determinado o nível superior de suspensão da argila. É introduzido, então, o pistão cuidadosamente na proveta até assentar completamente na areia, conforme a Figura 25, e girado até um que um dos parafusos de ajustagem fique visível. Nesta posição, fixa-se a haste do pistão, e determina o nível superior da areia. O equivalente de areia é calculado através da fórmula abaixo:

$$EA = \frac{\text{Leitura no topo da areia}}{\text{Leitura no topo da argila}} \times 100$$

3.2.1.5 Forma das partículas

A amostragem para a determinação do índice de forma pelo método do paquímetro (Figura 26) foi obtida por meio dos procedimentos estabelecidos pela norma ABNT NBR 7809:2005. Segundo essa norma, o índice de forma do agregado é “a média da relação entre o comprimento e a espessura dos grãos do agregado, ponderada pela quantidade de grãos de cada fração granulométrica que o compõe”. A quantidade mínima da amostragem dos agregados é determinada conforme a Tabela 9:

Tabela 9 - Quantidade mínima de material para ensaio (forma das partículas)

Fração granulométrica (abertura da peneira)	Massa mínima da amostra inicial (kg)
≤ 19 mm	5
> 19 mm e ≤ 25 mm	10
> 25 mm e ≤ 37,5 mm	15
> 37,5 mm	20

Fonte: ABNT (2005)

Para agregados com fração granulométrica menor ou igual a 19 mm é preciso de uma amostragem mínima de 5 kg para a realização da análise granulométrica, logo foi utilizado o peneiramento de 7 kg de brita 1 previamente realizado para enquadramento dos materiais nas faixas de concreto asfáltico do DNIT. Ainda sobre a amostragem, a ABNT NBR 7809:2005 estabelece que seja desprezada as frações passantes na peneira com abertura de malha de 9,5

mm e aquelas cujas porcentagens, em massa, retidas individuais sejam iguais ou menores que 5%.

Após a análise granulométrica, é obtida a quantidade de partículas de cada fração pela seguinte fórmula:

$$N_i = \frac{200}{\sum_{i=1}^n F_i} \times F_i$$

Onde:

200 é o número de grãos necessários para a realização do ensaio;

N_i é o número de grãos a serem medidos na fração i ;

F_i é a porcentagem de massa retida individual na fração i ;

Obs.: quando N_i for fracionário, deve ser arredondado ao inteiro mais próximo.

Figura 26 - Paquímetro



Fonte: Autor (2019)

Obtidos todos os grãos necessários para o cálculo do índice de forma pela norma ABNT NBR 7809/2005, foram efetuadas com o auxílio do paquímetro as medidas das três dimensões das partículas: comprimento (a), largura (b) e espessura (c). A classificação das partículas em cúbica, alongada, lamelar ou alongada-lamelar foi realizada segundo a norma ABNT NBR 6954/1989, realizando as razões b/a e c/b (Tabela 10).

Tabela 10 - Classificação da forma dos agregados

Média das relações b/a e c/b	Classificação da Forma
$b/a > 0,5$ e $c/b > 0,5$	Cúbica
$b/a < 0,5$ e $c/b > 0,5$	Alongada
$b/a > 0,5$ e $c/b < 0,5$	Lamelar
$b/a < 0,5$ e $c/b < 0,5$	Alongada-lamelar

Fonte: ABNT (1989)

A Figura 27 apresenta amostras de agregados com diferentes formas.

Figura 27 - Exemplo de agregados com diferentes formas



(a) Agregado lamelar

(b) Agregado de boa cubicidade

Fonte: Bernucci *et al.* (2006)

3.2.1.6 Adesividade

Adesividade de agregado a material betuminoso é a propriedade que tem o agregado de ser aderido por um material betuminoso. É verificada pelo não deslocamento da película betuminosa que recobre o agregado, quando a mistura agregado-ligante submetida, a 40 °C, à ação de água destilada, durante 72 horas (DNER-ME 078, p. 2).

O ensaio de adesividade a ligante betuminoso do agregado graúdo é prescrito pela norma DNER-ME 078/94. A amostra de agregado para ser utilizado no ensaio é obtida peneirando a brita e separando 500 g de material passante na peneira de 19 mm e retido na peneira de 12,7 mm. A amostra é, então, lavada e colocada dentro d'água destilada por um minuto. Em seguida, secada na estufa a uma temperatura de 120 °C por duas horas.

A amostra de agregado é aquecida a temperatura de 100 °C e o CAP a 120° C. Em seguida, 17,5 g de cimento asfáltico é colocado sobre o agregado, e com a espátula é procedido o completo envolvimento do agregado com o ligante. O material é colocado no béquer, totalmente recoberto com água destilada (Figura 28), e levado a estufa por 72 horas a uma

temperatura de 40 °C. Por fim, a amostra é exposta em uma placa , e o resultado da adesividade é obtida por uma análise visual (Figura 29).

Figura 28 - Agregado envolvido com ligante



Fonte: Autor (2019)

Figura 29 - Amostra exposta sobre a placa



Fonte: Autor (2019)

3.2.2 Ensaios de caracterização das cinzas

3.2.2.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica da cinza foi realizada conforme a seção 3.2.1.1. Para a realização do ensaio foi usada uma amostragem de 1 kg de cinza volante de acordo com a Tabela 5. Segundo a norma DNER-EM 367/97, o material de enchimento para misturas betuminosas deverá possuir a granulometria dentro dos limites expressos na Tabela 11.

Tabela 11 - Granulometria do fíler

Abertura de malha (mm)	%, em peso, passando
0,42	100
0,18	95 - 100
0,075	65 - 100

Fonte: DNER (1997)

3.2.2.2 Massa específica

A norma DNER-ME 085/94 apresenta os procedimentos para determinação da massa específica das cinzas volantes utilizando o frasco Le Chatelier. Coloca-se no frasco querosene até que seu nível superior fique entre as graduações 0 e 1 ml, como mostrado na Figura 30.

Figura 30 - Frasco Le Chatelier



Fonte: Autor (2019)

Figura 31 - Cinza colocada no frasco



Fonte: Autor (2019)

Em seguida, o frasco é colocado em banho d'água, onde permanece durante um intervalo de tempo suficiente para que as temperaturas do banho e do conteúdo do frasco não difiram mais de 0,2 °C. Após o equilíbrio de temperatura, retira-se o frasco do banho d'água e a primeira leitura do nível superior do querosene é feita.

Já a leitura final foi realizada após aproximadamente 50 g de cinza ser colocada no frasco (Figura 31), e este voltar novamente para banho d'água até ser atingido o equilíbrio térmico. Ressalta-se que norma DNER-ME 085/94 recomenda utilizar cerca 60 g de material para a realização do ensaio, porém como a cinza volante apresenta uma massa específica baixa

quando comparada a outros materiais que são normalmente ensaiados, o volume do líquido deslocado é tanto que não é possível fazer a leitura final. Para nível de comparação, também foi determinada a massa específica do cimento.

Subtraindo a leitura final da inicial se obtém o volume do querosene deslocado pelo material ensaiado. A massa específica é calculada pela fórmula:

$$\text{massa específica} = \frac{\text{massa do material}}{\text{volume do líquido deslocado}}$$

3.2.3 Ensaio de caracterização do ligante

3.2.3.1 Penetração

O ensaio da determinação da penetração de materiais betuminosos é estabelecido pela norma DNIT 155/2010-ME. A norma ainda define penetração como “profundidade, em décimos de milímetro, que uma agulha padrão penetra verticalmente na amostra de material sob condições prefixadas de carga, tempo e temperatura”.

Para a realização do ensaio, o cimento asfáltico de concreto foi aquecido, evitando superaquecimento local, até se tornar fluido. Em seguida, a amostra foi derramada no recipiente de penetração com aproximadamente 55 mm de diâmetro interno e 35 de altura interna, de acordo com a Tabela 12:

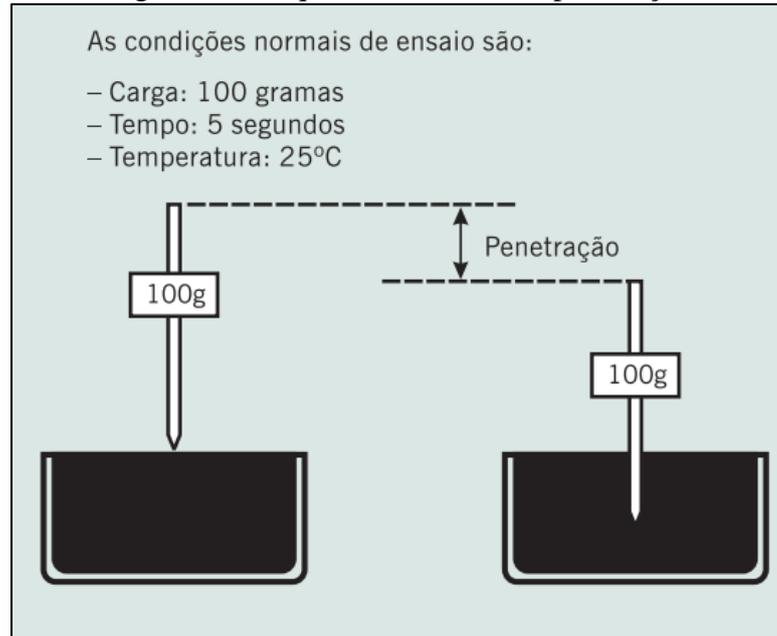
Tabela 12 - Dimensões do recipiente de ensaio (penetração)

Para material de penetração (0,1 mm)	Diâmetro interno mm	Altura interna mm
40 a 200	55	35
≥ 201	55 - 75	45 – 70

Fonte: DNIT (2010)

Após despejada a amostra, é colocada uma tampa no recipiente durante um intervalo de tempo de resfriamento de 60 minutos a 90 minutos, para proteger a amostra contra poeira. A seguir, a amostra, juntamente com um béquer, é colocada no banho d'água e mantida durante o mesmo intervalo de tempo citado anteriormente a temperatura de ensaio de 25 °C ± 0,1. As demais condições de ensaio são 100 g de carga e 5 segundos de penetração (Figura 32).

Figura 32 - Esquema do ensaio de penetração



Fonte: Bernucci *et al.* (2006)

Passado o tempo de permanência no banho d'água, o recipiente contendo a amostra é colocado dentro do béquer de tal modo que a amostra fique totalmente submersa. Então, o béquer é posto sobre o prato do penetrômetro (Figura 33), e a agulha na haste é ajustada à superfície da amostra, de forma que sua ponta não exerça nenhuma pressão sobre o material.

Figura 33 - Vista do penetrômetro



Fonte: Autor (2019)

Após o ajuste, liberar rapidamente a agulha durante 5 segundos e fazer a leitura do mostrador do penetrômetro. São realizadas, pelo menos, três determinações em pontos distantes entre si e da borda do recipiente de, no mínimo, 10 mm. A penetração, em décimos de

milímetro, é a média obtida das leituras realizadas, cujos valores não se afastem mais que os indicados na Tabela 13.

Tabela 13 - Critérios para indicação de resultado de penetração

Penetração (0,1 mm)	Diferença máxima entre o valor mais alto e valor mais baixo das determinações (0,1 mm)
0 até 49	2
50 até 149	4
150 até 249	12
250 até 500	20

Fonte: DNIT (2010)

3.2.3.2 Ponto de amolecimento

Para a determinação do ponto de amolecimento em materiais asfálticos, a norma DNIT 131/2010 faz uso do método do anel e bola. Inicialmente a amostra é preparada, aquecendo o material a aproximadamente 135° C, com o intuito de deixá-lo fluido, tomando cuidado para evitar aquecimento localizado. Então, cerca de 200 g a 250 g do material são colocados em um béquer e novamente aquecido, durante no máximo 30 minutos a uma temperatura que não seja maior do que 110 °C acima do ponto de amolecimento provável.

Após o aquecimento do ligante asfáltico, a amostra fluida é colocada nos anéis, que devem estar sobre um chapa plana tratada com mistura de glicerina e dextrina, e deixada durante 30 minutos ao ar para resfriar. Após o resfriamento, os anéis são desprendidos da chapa e posicionados horizontalmente no suporte.

A seguir, as guias das bolas são colocadas sobre os anéis e introduzidas no béquer cheio com água destilada. As duas bolas também são colocadas na aparelhagem, mas no fundo do béquer, e não sobre os anéis (Figura 34). Já o termômetro ASTM 15 C, segundo a norma DNIT 131/2010, “deve ficar suspenso, no suporte, de tal modo que o fundo do bulbo fique no mesmo nível da borda inferior dos anéis e afastado 13 mm destes”.

Figura 34 - Aparelho montado do ensaio do ponto de amolecimento



Fonte: Autor (2019)

O conjunto é, então, levado a banho à uma temperatura de $(5 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ por 15 minutos. Após o banho, é colocada uma bola em cada anel com ajuda de uma pinça. O conjunto deve ser aquecido a uma razão de $(5 \pm 0,5) \text{ }^\circ\text{C}$ por minuto. São realizadas duas leituras através do termômetro, uma para cada bola, quando o material que envolve a bola tocar a placa inferior. A média das duas leituras é o resultado do ponto de amolecimento da mistura asfáltica. Se a diferença entre as duas leituras exceder $1 \text{ }^\circ\text{C}$, o ensaio deve ser repetido.

3.2.3.3 Viscosidade do material betuminoso

A norma ABNT NBR 14950:2003 prescreve dois procedimentos para a determinação da viscosidade Saybolt Furol (Figura 35) de materiais betuminosos, sendo o procedimento A empregado para produtos com temperaturas de ensaio entre $21 \text{ }^\circ\text{C}$ a $99 \text{ }^\circ\text{C}$, e o procedimento B para produtos com temperaturas de ensaio entre $120 \text{ }^\circ\text{C}$ a $240 \text{ }^\circ\text{C}$.

O procedimento utilizado para a determinação da viscosidade do ligante asfáltico foi o procedimento B. Neste caso, as temperaturas-padrão para a realização do ensaio de viscosidade Saybolt Furol são: $121 \text{ }^\circ\text{C}$, $135 \text{ }^\circ\text{C}$, $149 \text{ }^\circ\text{C}$, $163 \text{ }^\circ\text{C}$, $177 \text{ }^\circ\text{C}$, $204 \text{ }^\circ\text{C}$ e $232 \text{ }^\circ\text{C}$.

Figura 35 - Saybolt-Furol



Fonte: Autor (2019)

A amostra deve ser aquecida em torno de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ acima da temperatura de ensaio para então ser colocada no tubo viscosímetro (Figura 36). Uma rolha deve ser previamente inserida no orifício Furol, de forma a evitar o vazamento da amostra. Quando a temperatura da amostra permanecer constante durante um minuto dentro de um intervalo de $\pm 0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ da temperatura de ensaio, pode-se retirar a rolha do viscosímetro e acionar o cronômetro (Figura 37). O cronômetro é parado quando a amostra alcançar a marca de graduação do frasco receptor.

Figura 36 - Realização do ensaio de viscosidade I



Fonte: Autor (2019)

Figura 37 - Realização do ensaio de viscosidade II



Fonte: Autor (2019)

As temperaturas de mistura e de compactação dos corpos de prova são estabelecidas através da viscosidade. Segundo a norma DNER-ME 043/95, “a temperatura que o ligante deve ser aquecido, para ser misturado aos agregados, é aquela na qual apresenta uma viscosidade de (170 ± 20) cSt ou (85 ± 10) sSF”, já a temperatura de compactação “é aquela na qual o ligante apresenta uma viscosidade de (280 ± 30) cSt ou (140 ± 15) sSF”.

3.2.4 Dosagem e ensaios mecânicos da mistura asfáltica

3.2.4.1 Dosagem Marshall

3.2.4.1.1 Estabilidade e Fluência

A norma DNER-ME 043/95, que trata do método de dosagem Marshall, apresenta os procedimentos para a determinação da estabilidade e da fluência de misturas asfálticas a quente para uso em pavimentação. A norma define estabilidade Marshall como “resistência máxima à compressão radial, apresentada pelo corpo de prova, quando moldado e ensaiado de acordo com o processo estabelecido neste método, expressa em N (kgf)” e fluência Marshall como “deformação total apresentada pelo corpo de prova, desde a aplicação da carga inicial nula até a aplicação da carga máxima, expressa em décimos de milímetro”.

O método Marshall recomenda no mínimo três corpos de prova para cada teor de CAP. Para a preparação das misturas, os agregados são secos em estufa a $(105$ a $110)$ °C até constância de massa e, depois, pesados de acordo com o traço escolhido, afim de produzir após a mistura com o ligante um corpo de prova com cerca de 1200 g. Os agregados devem ser aquecidos à temperatura 10 °C a 15 °C acima da temperatura de aquecimento do ligante (Figura

38). A seguir, são misturados os agregados e o ligante asfáltico dentro dos limites de temperatura estabelecidos pela viscosidade do CAP. A mistura é, então, realizada até completa cobertura dos agregados e colocada no molde de compactação (Figura 39), que deve estar aquecido a (90 a 150) ° C.

Figura 38 - Controle da temperatura de mistura



Fonte: Autor (2019)

Figura 39 - Moldes de compactação



Fonte: Autor (2019)

O molde, com uma folha de papel-filtro, é colocado no suporte de compactação (Figura 40). A mistura é então introduzida no molde, onde será acomodada com 15 golpes de espátula no interior e ao redor do molde e com 10 no centro de massa. Depois que a temperatura de compactação é alcançada (Figura 41), aplica-se com o soquete 75 golpes sobre cada face da mistura, com altura de queda livre de 45,72 cm. Após a compactação, o corpo de prova é deixado em repouso em temperatura ambiente por no mínimo 12 horas sobre uma superfície lisa e plana.

Figura 40 - Compactador



Fonte: Autor (2019)

Figura 41 - Controle da temperatura de compactação



Fonte: Autor (2019)

Para determinação da estabilidade e da fluência, os corpos de prova são imersos em banho-maria a 60°C , sendo permitida a variação de 1°C , por um período de 30 a 40 minutos (Figura 42). Em seguida, os corpos de prova são colocados nos moldes de compressão (Figura 43) que devem estar a uma temperatura de $(21 \text{ a } 38)^{\circ}\text{C}$. O molde, então, é posicionado na prensa (Figura 44), que é operada de tal modo que seu êmbolo se eleve a uma velocidade de 5 cm por minuto, até o corpo de prova se romper.

Figura 42 - Corpos de prova em banho-maria



Fonte: Autor (2019)

Figura 43 - Molde de compressão



Fonte: Autor (2019)

Figura 44 - Prensa Marshall



Fonte: Autor (2019)

A carga, em N (Kgf), capaz de ocasionar o rompimento do corpo de prova à temperatura de 60 °C é a “estabilidade lida”. Tal valor será multiplicado por um fator de correção de acordo com a espessura do corpo de prova, que é encontrado através da fórmula abaixo:

$$f = 927,23 h^{-1,64}$$

Onde:

F – fator em função da espessura do corpo de prova;

h – espessura do corpo de prova em mm.

O resultado da multiplicação entre a “estabilidade lida” e o fator de correção é valor da estabilidade Marshall. O valor da fluência é obtido simultaneamente ao da estabilidade. No momento em que se der o rompimento do corpo de prova, a leitura no medidor de fluência é feita.

3.2.4.1.2 Parâmetros volumétricos

Para a dosagem da mistura devem ser estudados os seguintes parâmetros dos corpos de prova (BERNUCCI *et al.*, 2006):

- massa específica aparente da mistura asfáltica compactada (G_{mb}) que é obtida pela fórmula:

$$G_{mb} = \frac{M_s}{V_{sub}}$$

Onde:

M_s – massa seca do corpo de prova compactado, g;

V_{sub} – volume do corpo de prova compactado submerso em água, cm^3 ;

- massa específica máxima teórica, ou tradicionalmente denominada densidade máxima teórica (DMT) é dada pela ponderação entre as massas dos constituintes da mistura asfáltica por meio da fórmula:

$$DMT = \frac{100}{\frac{\%a}{G_a} + \frac{\%Ag}{G_{Ag}} + \frac{\%Am}{G_{Am}} + \frac{\%f}{G_f}}$$

Onde:

$\%a$ – porcentagem de asfalto, expressa em relação à massa total da mistura asfáltica;

$\%Ag$, $\%Am$ e $\%f$ – porcentagens do agregado graúdo, agregado miúdo e fíler, respectivamente em relação à massa total da mistura asfáltica;

G_a , G_{Ag} , G_{Am} e G_f – massas específicas reais do ligante asfáltico, do agregado graúdo, do agregado miúdo e do fíler, respectivamente.

- volume de vazios (V_v) é o volume de ar que existe na mistura em relação ao volume total da mistura, obtido pela expressão:

$$V_v = \frac{DMT - G_{mb}}{DMT}$$

- vazios cheios com betume (V_b) é o volume preenchido pelo ligante asfáltico cujo valor é obtido por meio da fórmula:

$$V_b = \frac{G_{mb} \times \%a}{G_a}$$

- vazios do agregado mineral (VAM) é a soma dos vazios não preenchidos (V_v) e dos vazios preenchidos por betume (V_b), ou seja, é o volume total de vazios da mistura, expresso por:

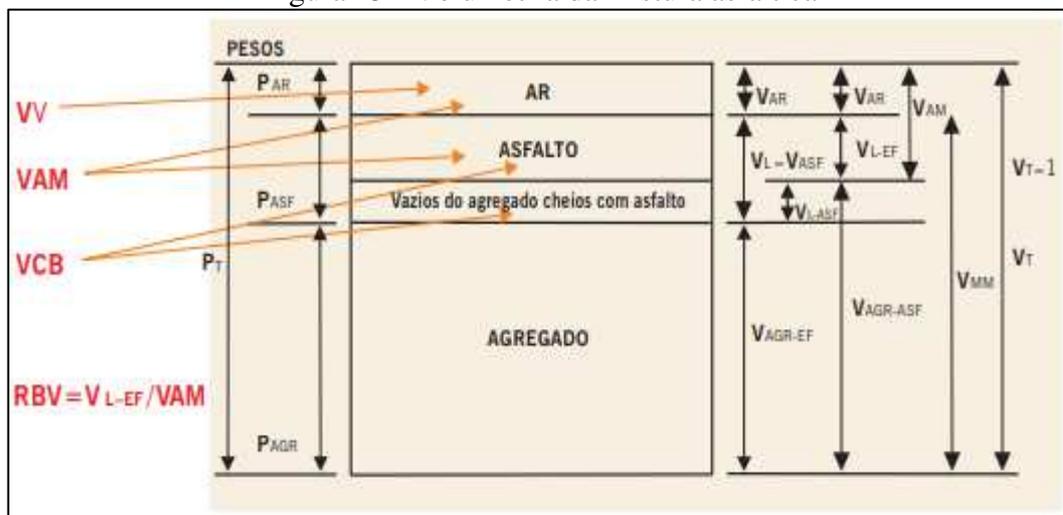
$$VAM = V_v + V_b$$

- relação betume vazios (RBV) é a relação entre o volume de ligante asfáltico e o volume de vazios expresso em porcentagem:

$$RBV = \frac{100 \times V_b}{VAM}$$

A Figura 45 esquematiza os parâmetros volumétricos da mistura asfáltica:

Figura 45 - Volumetria da mistura asfáltica



Fonte: Bernucci *et al.* (2006)

3.2.4.2 Resistência à tração por compressão diametral

A norma DNIT 136/2010 – ME estabelece os métodos para determinar a resistência à tração por compressão diametral de misturas asfálticas. Inicialmente, mede-se a altura (H) do corpo de prova com paquímetro, em quatro posições equidistantes. A seguir, é realizada a medição do diâmetro (D), também com o paquímetro, em três posições paralelas. A altura e o diâmetro adotados são os valores da média aritmética das leituras.

O corpo de prova é, então, levado a estufa por duas horas a uma temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,1$. Passado o tempo, o corpo de prova é colocado com sua superfície cilíndrica entre dois frisos metálicos curvos (Figura 46). Depois que a amostra do ensaio é ajustada na prensa, é aplicada a carga de maneira progressiva, com uma velocidade de deformação de $0,8 \pm 0,1 \text{ mm/s}$ até que se dê a ruptura por separação das duas metades do corpo de prova, segundo o plano diametral vertical. Por fim, é anotado o valor da carga de ruptura (F).

Figura 46 - Molde com frisos metálicos



Fonte: Autor (2019)

A resistência à tração do corpo de prova por compressão diametral é obtida pela fórmula abaixo:

$$\sigma_R = \frac{2F}{\pi DH}$$

Onde:

σ_R – resistência à tração, em kgf/cm²;

F – carga de ruptura, em kgf;

D – diâmetro do corpo de prova, em cm;

H – altura do corpo de prova, em cm.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Ensaio de caracterização dos agregados e do fíler

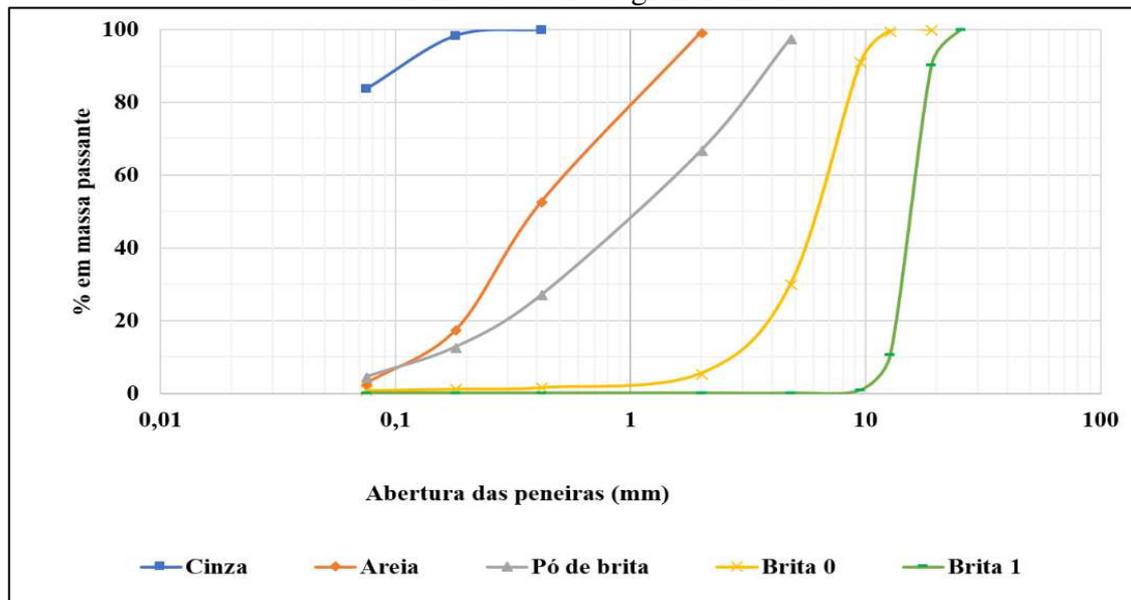
Os resultados da análise granulométrica dos agregados e do fíler estão apresentados na Tabela 14, e as curvas granulométricas estão representadas no Gráfico 1.

Tabela 14 - Resultados da granulometria

Peneiras		% em massa passante				
mm	#	Cinza	Areia	Pó de brita	Brita 0	Brita 1
50,8	2"	100	100	100	100	100
38,1	1 1/2"	100	100	100	100	100
25,4	1"	100	100	100	100	100
19,1	3/4"	100	100	100	100	90,4
12,7	1/2"	100	100	100	99,8	10,7
9,5	3/8"	100	100	100	91,2	0,9
4,8	Nº 4	100	100	97,5	30,1	0,1
2	Nº 10	100	99,4	66,8	5,5	0,1
0,42	Nº 40	100	52,8	27,3	1,6	0,1
0,18	Nº 80	98,3	17,6	12,8	1,2	0,1
0,075	Nº 200	83,7	2,7	4,5	0,8	0,1

Fonte: Autor (2019)

Gráfico 1 - Curvas granulométricas



Fonte: Autor (2019)

A cinza volante para ser usada como material de enchimento precisa possuir granulometria de acordo com a norma DNER-EM 367/97. A Tabela 15 apresenta os resultados da granulometria da cinza volante, comparando-os com a especificação da norma e com a pesquisa de Bohara e Tamrakar (2018).

Tabela 15 - Comparação da granulometria da cinza volante

Peneiras		% em massa passante		
mm	#	Resultado	Bohara e Tamrakar (2018)	Especificação
0,42	Nº 40	100	100	100
0,18	Nº 80	98,3	97	95-100
0,075	Nº 200	83,7	83	65-100

Fonte: Autor (2019)

Como pode ser visto, a cinza utilizada satisfaz as condições da norma quanto ao tamanho das partículas e apresentou granulometria semelhante a cinza utilizada no trabalho de Bohara e Tamrakar (2018).

Já em relação a granulometria da brita 0, observa-se uma porcentagem significativa de agregado miúdo (29,3%), o que afeta a massa específica do material. Na Tabela 16, são apresentadas as massas específicas dos materiais, comparando os resultados obtidos com outros estudos.

Tabela 16 - Resultados das massas específicas

Constituintes	Massa específica (g/cm ³)			
	Resultados dos ensaios	Bernucci <i>et al.</i> (2006)	Mistry e Roy (2016)	Bohara e Tamrakar (2018)
Cinza	2,359	-	2,320	2,150
Cimento	2,720	2,780	-	-
Areia	2,646	2,645	-	-
Pó de brita	2,747	2,640	-	-
Brita 0	2,781	2,656	-	-
Brita 1	2,875	2,656	-	-

Fonte: Autor (2019)

Para o ligante asfáltico foi adotada a massa específica estabelecida pelo fabricante de 1,027 g/cm³.

Quanto à absorção, pureza e resistência ao desgaste dos agregados, os resultados obtidos nos ensaios estão demonstrados nas Tabelas 17, 18 e 19 respectivamente.

Tabela 17 - Resultados da absorção dos agregados graúdos

Absorção	
Brita 1	0,40%
Brita 0	0,90%

Fonte: Autor (2019)

A norma DNIT 031/2006 – ES não estabelece valores permitidos de absorção. Contudo a AASHTO T 85 (apud BERNUCCI *et al.*, 2006) recomenda que a absorção seja $\leq 2\%$. Assim os agregados graúdos usados para a confecção dos corpos de prova apresentam resultados satisfatórios para utilização na pavimentação.

Tabela 18 - Resultado do equivalente de areia

Ensaio	Topo da areia (mm)	Topo da argila (mm)	Resultados (%)
Proveta 1	7,00	8,20	85,37
Proveta 2	7,00	8,35	83,83
Proveta 3	7,20	8,40	85,71
EQUIVALENTE DE AREIA MÉDIO (%)		84,97	

Fonte: Autor (2019)

O agregado miúdo, segundo a norma DNIT 031/2006 – ES, deve apresentar equivalente de areia igual ou superior a 55%. Logo, a areia ensaiada não apresentou quantidade significativa de materiais deletérios, tornando-a assim própria para utilização em revestimentos asfálticos.

Tabela 19 - Resultados da resistência à abrasão

Agregados	Resultado (%)
Brita 0	15,08
Brita 1	12,42

Fonte: Autor (2019)

Ainda de acordo com a norma DNIT 031/2006 - ES, o desgaste Los Angeles deve ser igual ou inferior a 50%. A brita 0 apresentou um desgaste 15,08%, enquanto a brita 1 obteve 12,42%, demonstrando, dessa maneira, propensão a resistir a quebras, degradação e desintegração.

Já a adesividade da brita 1 ao ligante betuminoso foi considerada insatisfatória, havendo deslocamento da película betuminosa, como mostra a Figura 47.

Figura 47 - Adesividade insatisfatória



Fonte: Autor (2019)

Quanto a sua forma, a brita foi classificada como granular, obtendo o valor de 0,78 para a relação largura/comprimento e 0,73 para a razão espessura/largura. A norma DNIT 031/2006 – ES exige que o agregado gráudo tenha índice de forma superior a 0,5, logo o agregado utilizado está dentro da condição estabelecida.

4.2 Ensaios de caracterização do ligante

O ensaio de penetração tem sido utilizado para a classificação dos cimentos asfálticos de concreto. O CAP utilizado na pesquisa apresentou valor médio de penetração de 61 décimos de milímetro (Tabela 20), sendo classificado como CAP 50/70.

Tabela 20 - Resultados do ensaio de penetração

Ensaio	Leitura inicial	Leitura final	Resultados (0,1 mm)
Leitura 1	54	116	62
Leitura 2	116	177	61
Leitura 3	177	240	63
PENETRAÇÃO MÉDIA (0,1 mm)			61

Fonte: Autor (2019)

O CAP 50/70 deve apresentar, segundo a ANP (2005, apud Bernucci *et al.*, 2006), ponto de amolecimento mínimo de 46°C. A temperatura encontrada foi de 52 °C (Tabela 21), satisfazendo as condições de suscetibilidade térmica.

Tabela 21 - Resultado do ensaio de ponto de amolecimento

Ensaio	Resultado	Temperatura mín.	Situação
Ponto de amolecimento	52 °C	46 °C	Satisfatório

Fonte: Autor (2019)

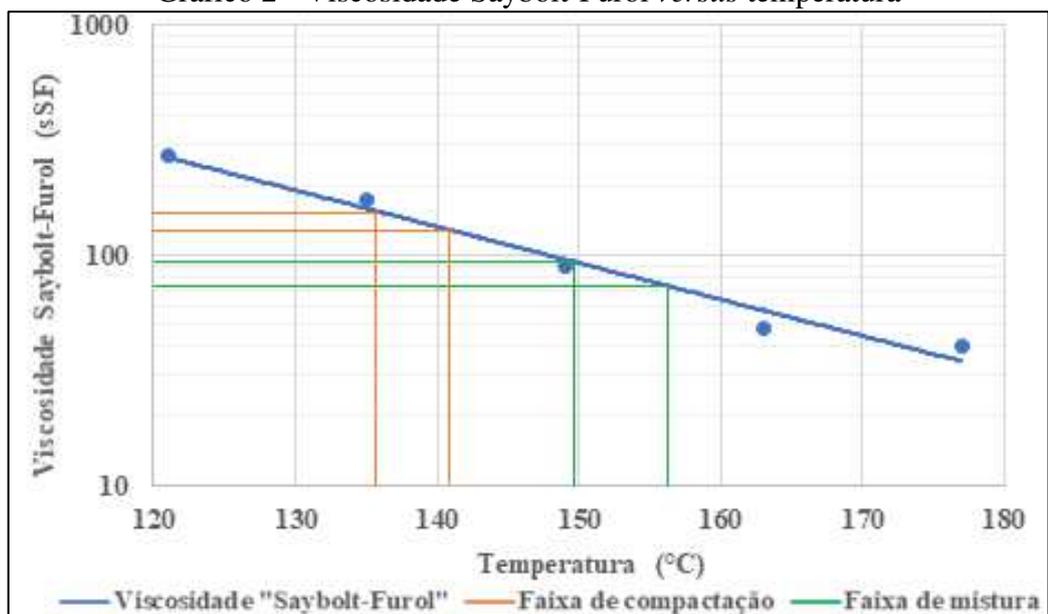
Quanto à viscosidade, o CAP apresentou os seguintes resultados demonstrados na Tabela 22:

Tabela 22 - Resultados do ensaio de viscosidade
Saybolt-Furol

Temperatura (°C)	Segundos Saybolt-Furol (sSF)
121	270
135	172
149	89
163	48
177	40

Fonte: Autor (2019)

Gráfico 2 - Viscosidade Saybolt-Furol *versus* temperatura



Fonte: Autor (2019)

A temperatura que o ligante deve ser aquecido, para ser misturado aos agregados, é a correspondente a viscosidade de (85 ± 10) sSF. Analisando o Gráfico 2, obtém-se o intervalo de $(150 \text{ a } 157)^\circ\text{C}$. O agregado deve ser aquecido a uma temperatura de 10 a 15 $^\circ\text{C}$ acima da temperatura do ligante. Já a temperatura de compactação corresponde a uma viscosidade de (140 ± 15) sSF. que resulta em um intervalo de $(136 \text{ a } 141)^\circ\text{C}$.

4.3 Traços e ensaios mecânicos da mistura

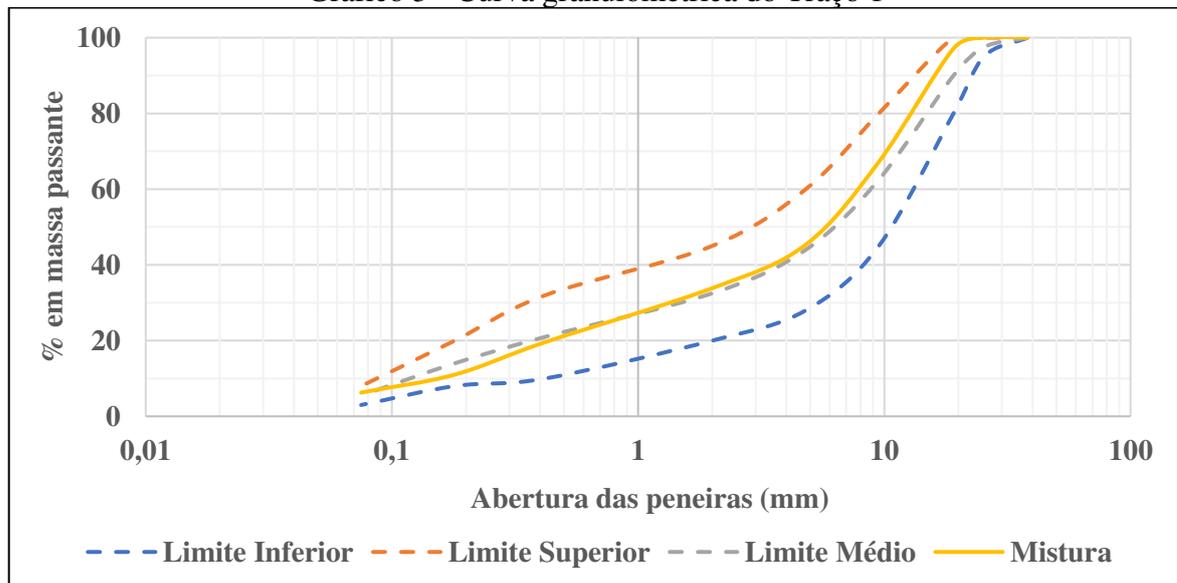
A fim de definir a porcentagem de cada material na mistura, foi realizado o enquadramento granulométrico dentro dos limites estabelecidos para a faixa B do DNIT. O traço que melhor se enquadrou (Traço 1) e sua curva granulométrica estão apresentados na Tabela 23 e Gráfico 3, respectivamente:

Tabela 23 - Enquadramento granulométrico do Traço 1

Peneira (mm)	% passante em massa						Faixa B		Limite Médio	Mistura
	Brita 1	Brita 0	Pó de brita	Areia	Cinza	%mín.	%máx.			
1 1/2"	38,1	100	100	100	100	100	100	100	100	
1"	25,4	100	100	100	100	100	95	100	97,5	
3/4"	19,1	90,4	100	100	100	100	80	100	90	
3/8"	9,5	0,9	91,2	100	100	100	45	80	62,5	
Nº 4	4,8	0,1	30,1	97,5	100	100	28	60	44	
Nº 10	2	0,1	5,5	66,8	99,4	100	20	45	32,5	
Nº 40	0,42	0,1	1,6	27,3	52,8	100	10	32	21	
Nº 80	0,18	0,1	1,2	12,8	17,6	98,3	8	20	14	
Nº 200	0,075	0,1	0,8	4,5	2,7	83,7	3	8	5,5	
TRAÇO 1	30%	35%	9%	20%	6%					

Fonte: Autor (2019)

Gráfico 3 - Curva granulométrica do Traço 1



Fonte: Autor (2019)

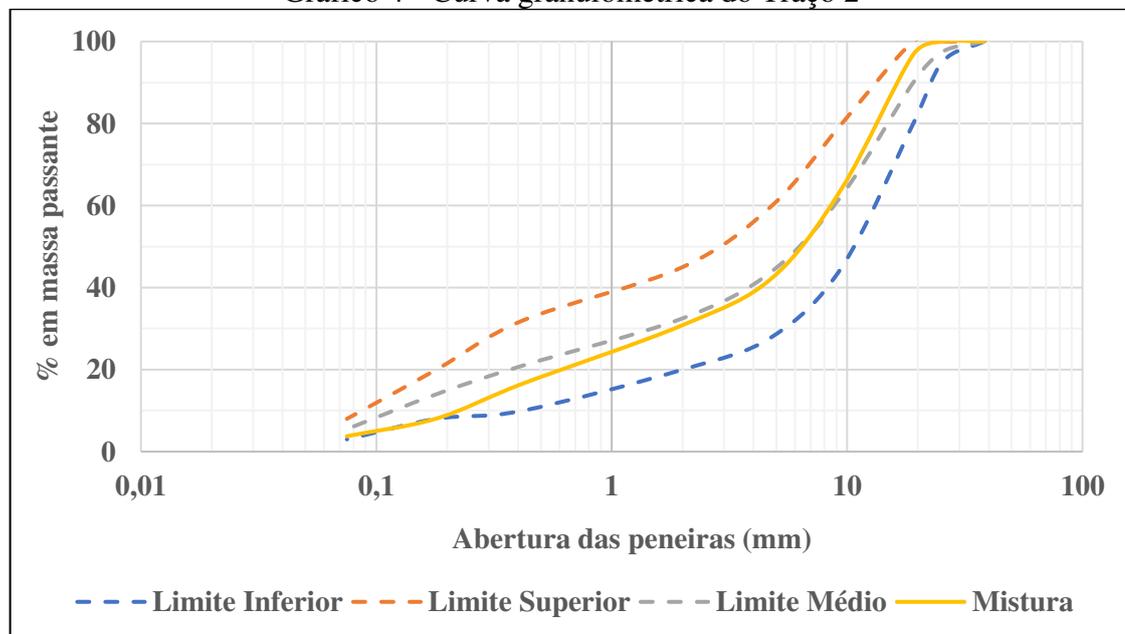
Para analisar a influência da adição das cinzas volantes nas misturas asfálticas a quente foram escolhidos mais dois traços: o Traço 2 foi obtido diminuindo a quantidade de cinza volante para 3% e aumentando a porcentagem de brita 1, já o Traço 3 foi obtido utilizando 3% de cimento passante na peneira N° 200. O enquadramento dos traços (Tabela 24 e 25) e suas curvas granulométricas (Gráfico 4 e 5) estão dispostos a seguir:

Tabela 24 - Enquadramento granulométrico do Traço 2

Peneira (mm)	% passante em massa					Faixa B		Limite Médio	Mistura
	Brita 1	Brita 0	Pó de brita	Areia	Cinza	%mín.	%máx.		
1 1/2"	38,1	100	100	100	100	100	100	100	100
1"	25,4	100	100	100	100	100	95	100	97,5
3/4"	19,1	90,4	100	100	100	100	80	100	90
3/8"	9,5	0,9	91,2	100	100	100	45	80	62,5
N° 4	4,8	0,1	30,1	97,5	100	100	28	60	44
N° 10	2	0,1	5,5	66,8	99,4	100	20	45	32,5
N° 40	0,42	0,1	1,6	27,3	52,8	100	10	32	21
N° 80	0,18	0,1	1,2	12,8	17,6	98,3	8	20	14
N° 200	0,075	0,1	0,8	4,5	2,7	83,7	3	8	5,5
TRAÇO 2	33%	35%	9%	20%	3%				

Fonte: Autor (2019)

Gráfico 4 - Curva granulométrica do Traço 2



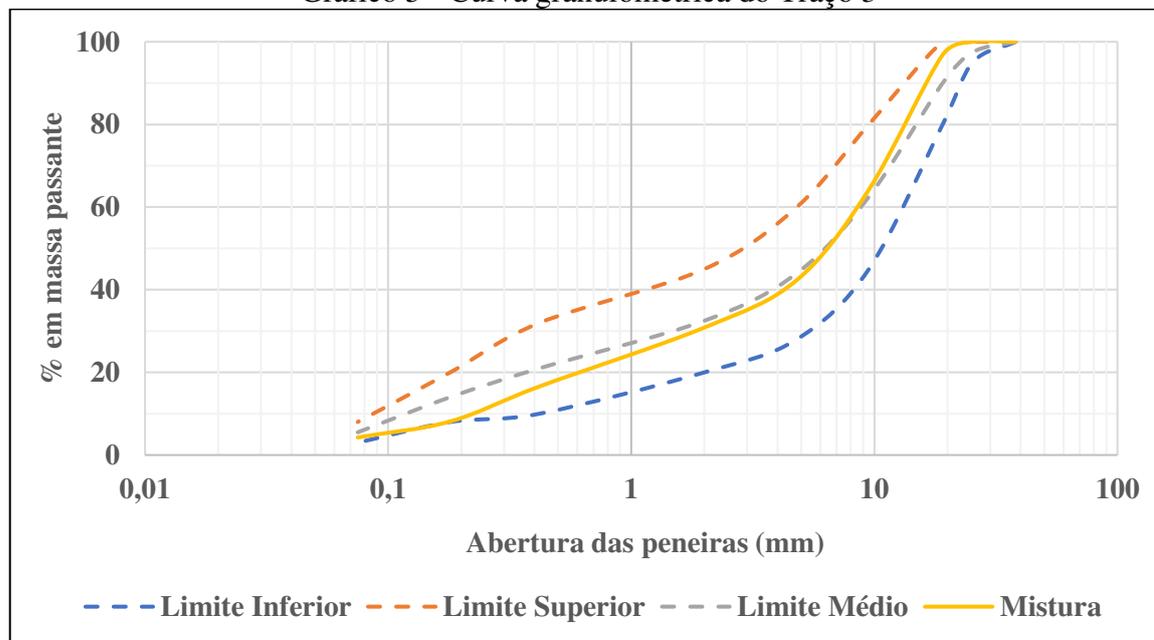
Fonte: Autor (2019)

Tabela 25 - Enquadramento granulométrico do Traço 3

Peneira (mm)		% passante em massa					Faixa B		Limite Médio	Mistura
		Brita 1	Brita 0	Pó de brita	Areia	Cimento	%mín.	%máx.		
1 1/2"	38,1	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1"	25,4	100	100	100	100	100	95	100	97,5	100
3/4"	19,1	90,4	100	100	100	100	80	100	90	96,8
3/8"	9,5	0,9	91,2	100	100	100	45	80	62,5	64,2
Nº 4	4,8	0,1	30,1	97,5	100	100	28	60	44	42,3
Nº 10	2	0,1	5,5	66,8	99,4	100	20	45	32,5	30,9
Nº 40	0,42	0,1	1,6	27,3	52,8	100	10	32	21	16,6
Nº 80	0,18	0,1	1,2	12,8	17,6	100	8	20	14	8,1
Nº 200	0,075	0,1	0,8	4,5	2,7	100	3	8	5,5	4,3
TRAÇO 3		33%	35%	9%	20%	3%				

Fonte: Autor (2019)

Gráfico 5 - Curva granulométrica do Traço 3



Fonte: Autor (2019)

A norma DNIT 031/2006 – ES determina para a faixa B o uso de 4,5 % a 7,5% de ligante asfáltico na mistura. Foram, então, confeccionados corpos de prova com 5,5%, 6% e 6,5% de CAP. Os valores dos parâmetros volumétricos assim como os valores de estabilidade e fluência, para cada teor de ligante, estão apresentados nas Tabelas 26 e 27. Em destaque estão os resultados que satisfizeram as condições da norma.

Tabela 26 - Parâmetros volumétricos do Traço 1.a

Teor de CAP (%)	DMT (g/cm ³)	Gmb (g/cm ³)	V _v (%)	V _b (%)	VAM (%)	RBV (%)
5,5	2,515	2,469	1,85	13,23	15,08	87,72
6,0	2,496	2,460	1,48	14,38	15,86	90,65
6,5	2,477	2,452	1,05	15,52	16,57	93,69
Limites da norma DNIT 031/2006 - ES para camada de rolamento			(3 a 5) %	-	> 14%	(75 a 82) %

Fonte: Autor (2019)

Tabela 27 - Resultados mecânicos do Traço 1.a

Teor de CAP (%)	Estabilidade (kgf)	Fluência (mm)	RT (MPa)
5,5	361	1,145	-
6,0	821	1,783	-
6,5	707	1,828	-
DNIT 031/2006 - ES	> 500 kgf	-	> 0,65 MPa

Fonte: Autor (2019)

Para a utilização de concreto asfáltico como camada de rolamento, as seguintes condições relacionadas aos parâmetros volumétricas não foram satisfeitas: porcentagem de vazios de (3 a 5) % e relação betume/vazios entre (75 a 82) %. Já o parâmetro de vazios do agregado mineral para tamanho nominal máximo de 25,4 mm apresentou resultados acima do estabelecido pela norma DNIT 031/2006 – ES que é de no mínimo 14%.

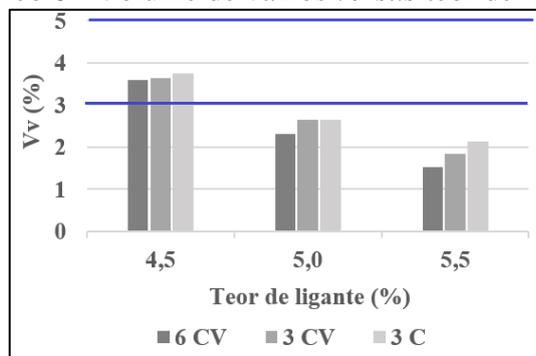
Os valores dos parâmetros volumétricos abaixo dos recomendados podem estar relacionados a uma elevada temperatura de compactação, causada pela utilização de amostras de CAP envelhecidos no ensaio de viscosidade. A norma ASTM D6926-16 recomenda compactar a mistura em um intervalo de (120 a 135) °C. Foram então confeccionados novos corpos de prova para os três traços escolhidos inicialmente, mas com diferentes teores de CAP (4,5%, 5,0% e 5,5%) e utilizando o intervalo de compactação recomendado pela norma americana. A Tabela 28 apresenta os parâmetros volumétricos dos traços estudados:

Tabela 28 - Parâmetros volumétricos dos traços

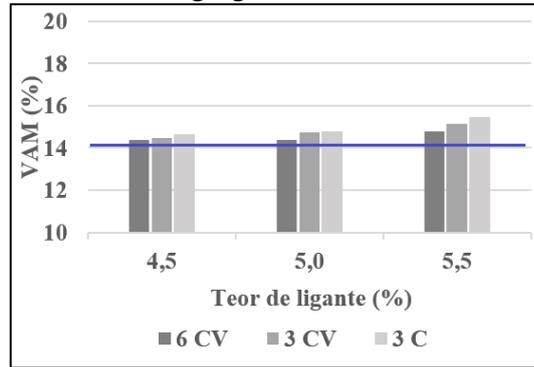
Teor de CAP (%)	DMT (g/cm ³)	Gmb (g/cm ³)	V _v (%)	V _b (%)	VAM (%)	RBV (%)
Traço 1.b		6% de cinza volante		6% CV		
4,5	2,554	2,463	3,59	10,8	14,39	75,03
5,0	2,535	2,460	2,31	12,06	14,37	83,94
5,5	2,515	2,452	1,53	13,27	14,80	89,60
Traço 2		3% de cinza volante		3% CV		
4,5	2,569	2,475	3,64	10,85	14,49	74,88
5,0	2,549	2,479	2,64	12,08	14,72	82,08
5,5	2,529	2,446	1,84	13,3	15,14	87,85
Traço 3		3% de cimento		3% C		
4,5	2,58	2,483	3,75	10,88	14,63	74,38
5,0	2,559	2,492	2,65	12,13	14,78	82,07
5,5	2,539	2,486	2,12	13,32	15,44	86,25
Limites da norma DNIT 031/2006 - ES para camada de rolamento			(3 a 5) %	-	> 14%	(75 a 82) %

Fonte: Autor (2019)

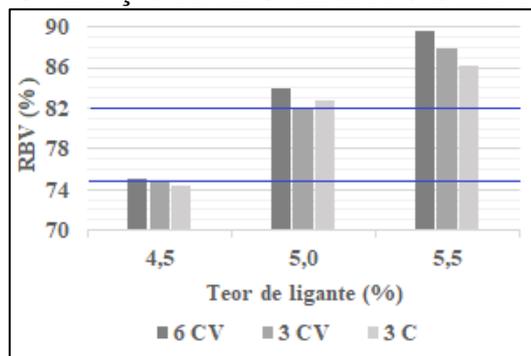
Analisando os resultados, apenas a mistura asfáltica com 6% de cinza volante e 4,5% de CAP satisfaz todas as condições dos parâmetros volumétricos. As misturas com o mesmo teor de ligante e com 3% de fíler não ficaram dentro dos limites de RBV estabelecido pela norma DNIT 031/2006, mas satisfizeram as demais condições. Os Gráficos 6, 7 e 8 mostram os resultados obtidos de V_v, VAM e RBV para cada teor de CAP e os limites da norma para cada parâmetro volumétrico.

Gráfico 6 - Volume de vazios *versus* teor de ligante

Fonte: Autor (2019)

Gráfico 7 - Volume do agregado mineral *versus* teor de ligante

Fonte: Autor (2019)

Gráfico 8 - Relação betume/vazios *versus* teor de ligante

Fonte: Autor (2019)

Os resultados dos ensaios mecânicos estão apresentados na Tabela 29:

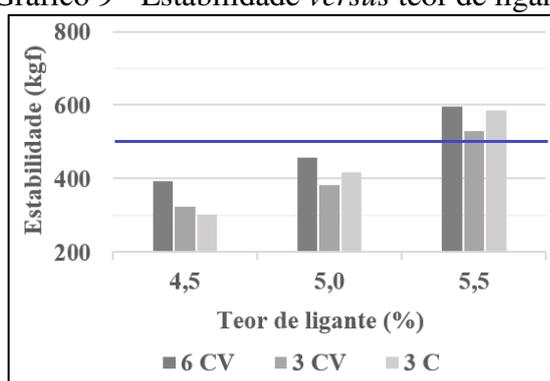
Tabela 29 - Resultados mecânicos dos traços

Teor de CAP (%)	Estabilidade (kgf)	Fluência (mm)	RT (MPa)
Traço 1.b			
6% de cinza volante		6% CV	
4,5	394	1,148	0,72
5,0	458	1,088	1,08
5,5	596	1,199	1,23
Traço 2			
3% de cinza volante		3% CV	
4,5	323	9,960	0,47
5,0	383	1,313	0,76
5,5	530	1,100	0,76
Traço 3			
3% de cimento		3% C	
4,5	301	0,954	0,34
5,0	417	1,167	0,37
5,5	586	1,380	0,35
Limites DNIT 031/2006	> 500 kgf	-	> 0,65 MPa

Fonte: Autor (2019)

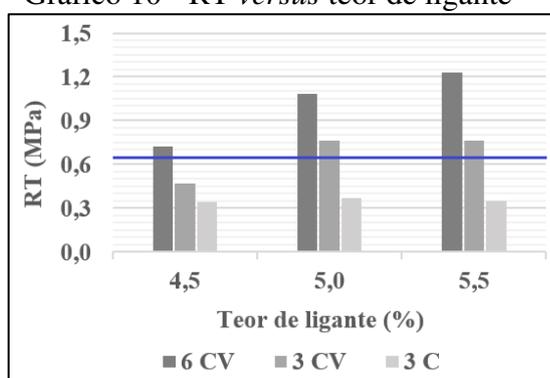
As misturas asfálticas com 5,5% de CAP atingiram a estabilidade exigida pela norma DNIT 031/2006, enquanto os corpos de prova com 4,5% de ligantes, que tiveram índices volumétricos aceitáveis, não apresentaram bons resultados. Em relação a resistência à tração por compressão diametral, as misturas asfálticas com cinza volante apresentaram, em sua maioria, valores acima do exigido pela norma, enquanto as misturas com cimento não atingiram o valor mínimo de 0,65 MPa. Os Gráficos 9 e 10 mostram os resultados de estabilidade e RT obtidos para cada teor de CAP assim como as condições exigidas pela norma.

Gráfico 9 - Estabilidade *versus* teor de ligante



Fonte: Autor (2019)

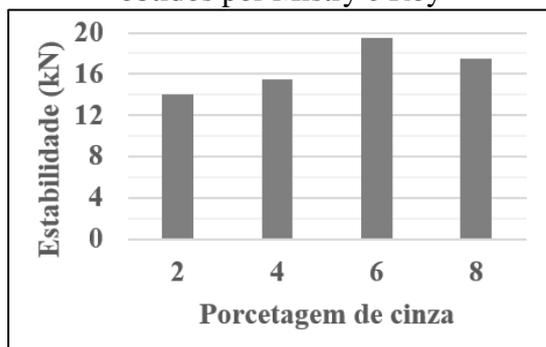
Gráfico 10 - RT *versus* teor de ligante



Fonte: Autor (2019)

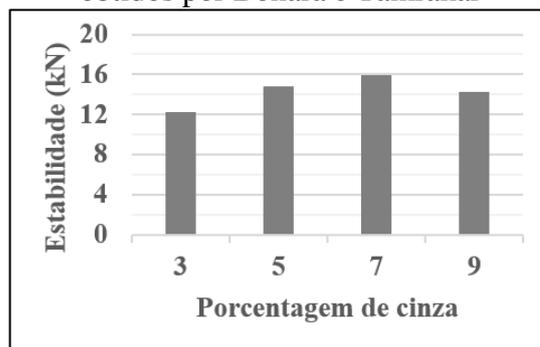
Pode-se notar ao comparar os resultados, que as propriedades mecânicas melhoraram com o aumento de cinza volante nas misturas asfálticas. Tal melhora acontece até determinada porcentagem, a partir daí, a estabilidade começa a decair com o acréscimo do fíler, como pode ser visto nos Gráficos 11 e 12, que apresentam os resultados obtidos por Mistry e Roy (2016) e Bohara e Tamrakar (2018).

Gráfico 11 - Resultados de estabilidade obtidos por Mistry e Roy



Fonte: Mistry e Roy (2016)

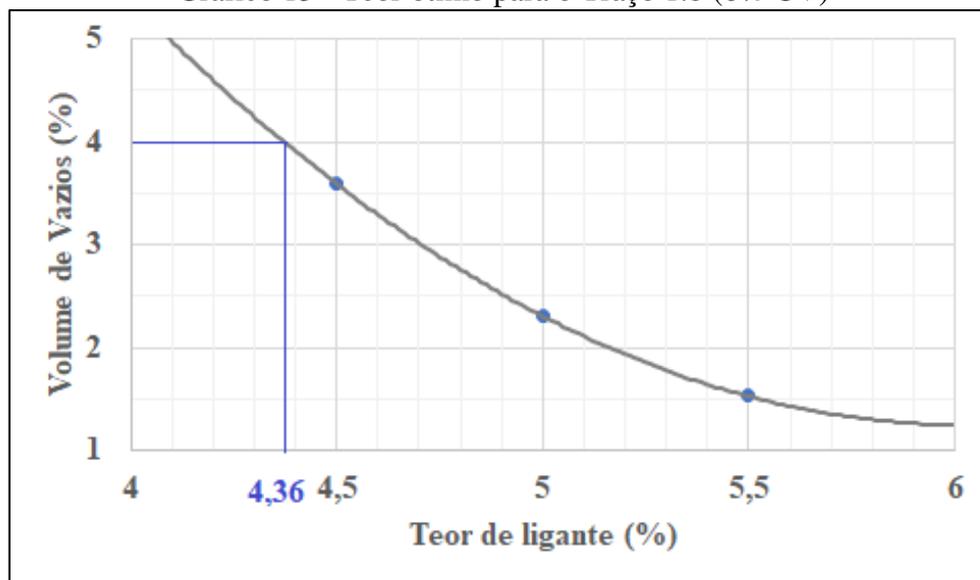
Gráfico 12 - Resultados de estabilidade obtidos por Bohara e Tamrakar



Fonte: Bohara e Tamrakar (2018)

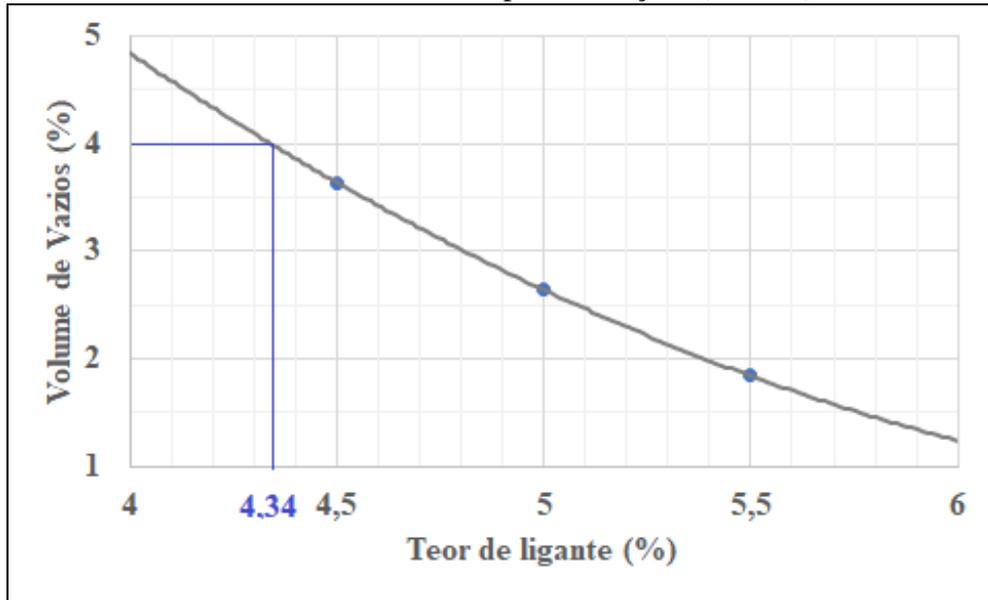
Dentre as metodologias abordadas por Bernucci *et al.* (2006) para o cálculo do teor de projeto, foi adotada a metodologia que associa o teor de CAP com o volume de vazios = 4%. Os teores ótimos encontrados para os Traços 1.b, 2 e 3 foram obtidos por meio dos Gráficos 13, 14 e 15, e deram, respectivamente, 4,36%, 4,34% e 4,41%, ficando abaixo dos valores recomendados pela norma DNIT 031/2006-ES, que são entre 4,5% a 7,5%

Gráfico 13 - Teor ótimo para o Traço 1.b (6% CV)



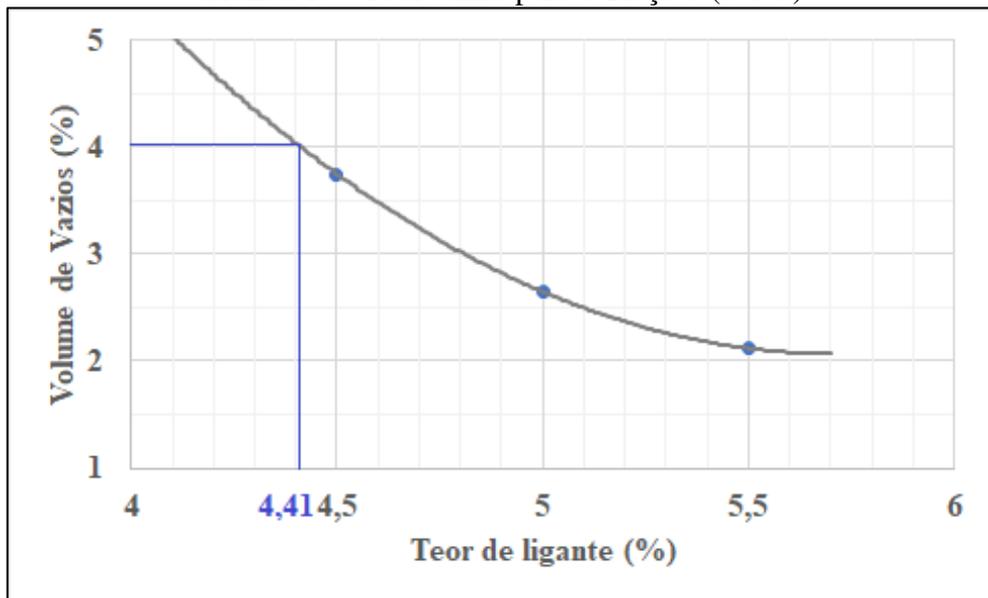
Fonte: Autor (2019)

Gráfico 14 - Teor ótimo para o Traço 2 (3% CV)



Fonte: Autor (2019)

Gráfico 15 - Teor ótimo para o Traço 3 (3% C)



Fonte: Autor (2019)

A confecção dos corpos de prova com os teores ótimos não foi realizada, já que analisando os resultados obtidos anteriormente os valores de estabilidade e RT tendem a diminuir com menos ligante na mistura.

5 CONCLUSÃO

O trabalho buscou analisar o potencial do uso das cinzas volantes, coletadas em uma termelétrica local, nas misturas asfálticas a quente por meio de ensaios laboratoriais. Os resultados obtidos para todos os traços estudados não satisfizeram as condições volumétricas e mecânicas exigidas pela norma DNIT 031/2006 – ES, que podem ter sido influenciados por:

- possíveis problemas nos termômetros, deixando comprometido o controle das temperaturas de mistura e compactação;
- possíveis problemas de calibração do compactador mecânico;
- uso de CAP envelhecido.

Embora não tenham conseguido os valores esperados, as misturas asfálticas preparadas com diferentes teores de ligante usando 3% de cimento no traço controle, assim como (3 e 6) % de cinza volante, apresentaram dados suficientes para listar algumas das influências da adição de cinza leve no concreto asfáltico. Da análise dos ensaios laboratoriais, as seguintes conclusões podem ser feitas:

- para a mesma porcentagem de fíler, as misturas asfálticas com cinza apresentaram valores de estabilidade menores que as misturas com cimento;
- para diferentes quantidades de fíler, as misturas asfálticas com mais cinza (6%) obtiveram resultados de estabilidade melhores que as misturas com menos cinza (3%);
- para a mesma porcentagem de fíler, os corpos de prova com cinza volante conseguiram resultados de resistência à tração por compressão diametral maiores que os corpos de prova com cimento;
- para diferentes quantidades de fíler, os corpos de prova com menos cinza (3%) apresentaram valores mais baixos de RT que os corpos de prova com mais cinza (6%);
- para diferentes teores de ligante, as misturas asfálticas com menos cinza (3%) tiveram valores de RT praticamente constantes, enquanto as misturas com mais cinza (6%) apresentaram um aumento significativo de RT à medida que mais CAP era usado;
- para a mesma porcentagem de fíler, corpos de prova com cinza apresentaram volume de vazios menores que os corpos de prova com cimento;

- para a mesma porcentagem de fíler, a relação betume vazios foi maior nas misturas asfálticas com cinza volante.

O trabalho não conseguiu provar a viabilidade mecânica das misturas asfálticas com cinza volante. No entanto, o uso desse resíduo sólido em revestimentos asfálticos é bastante difundido nos Estados Unidos e na Índia, países cuja produção de cinzas volantes é alta.

Para futuros trabalhos, sugere-se:

- estudar o comportamento das cinzas volantes em revestimentos do tipo SMA, pois é uma tecnologia bastante empregada em alguns países, principalmente na Índia;
- realizar uma comparação entre os efeitos da cinza volante, do cal e do cimento nos revestimentos asfálticos;
- refazer os ensaios com os traços propostos neste trabalho, utilizando termômetros de asfalto novos, ligante novo e melhorador de adesividade, além de compactar manualmente os corpos de prova.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO. **Handbook of hot-mix asphalt paving**. American Association of State Highway and Transportation Officials, 1991.
- ACAA. **Fly Ash Facts for Highway Engineers**. American Coal Ash Association. 2017.
- AHMARUZZANMAN, M. **A review on the utilization of fly ash**. Progress in Energy and Combustion Science. 2010.
- AMORMINO JUNIOR, Maurício. **Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado**. 4 ed. São Paulo (SP): CEMPRE, 2018.
- ANDRADE, A. C. G. **Tijolos de cinza volante e cal: estudo de desempenho quanto à resistência absorção durabilidade e aderência**. Dissertação de Mestrado. UFRGS. Porto Alegre, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro. 2004.
- _____. **NBR 14950: Materiais betuminosos – Determinação da viscosidade Saybolt Furol**. Rio de Janeiro. 2003.
- _____. **NBR 6954: Lastro-padrão – Determinação da forma do material**. Rio de Janeiro. 1989.
- _____. **NBR 7809: Agregados graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio**. Rio de Janeiro. 2005.
- ASTM C618-05, **Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005.
- ASTM D6926-16, **Standard Practice for Preparation of Asphalt Mixture Specimens Using Marshall Apparatus**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- BARDINI, Vivian Silveira dos Santos. **Influência do Fíler Mineral em Propriedades de Misturas Asfálticas Densas**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2013.
- BARDINI, Vivian Silveira dos Santos; *et al.* **Influência do fíler mineral no comportamento reológico de mástiques asfálticos**. TRANSPORTES v.20, n. 3. 2012.
- BERNUCCI, Liedi Bariani; *et al.* **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBAS: ABEDA, 2006.
- BOHARA, Niraj; TAMRAKAR, Gautam Bir Singh. **Study of the Influence of Fly Ash and Its Content in Marshall Properties of Asphalt Concrete**. Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies. 2018.
- BRASIL. Lei Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, 2010.

CEZAR, Daiana de Souza. **Características de Durabilidade de Concretos com Cinzas Volante e Cinza de Casca de Arroz com e sem Beneficiamento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Centro de Tecnologia. Santa Maria. 2011.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE. **Transporte rodoviário: por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?** Brasília: CNT, 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-EM 367/97: **Material de enchimento para misturas betuminosas**. Rio de Janeiro. 1997.

_____. DNER-ME 035/98: **Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”**. Rio de Janeiro. 1998.

_____. DNER-ME 043/95: **Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall**. Rio de Janeiro. 1995.

_____. DNER-ME 054/97: **Equivalente de areia**. Rio de Janeiro. 1997.

_____. DNER-ME 078/94: **Agregado graúdo – adesividade a ligante betuminoso**. Rio de Janeiro. 1994.

_____. DNER-ME 083/98: **Agregados – análise granulométrica**. Rio de Janeiro. 1998.

_____. DNER-ME 085/94: **Material finamente pulverizado – determinação da massa específica real**. Rio de Janeiro. 1994.

_____. DNER-ME 194/98: **Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman**. Rio de Janeiro. 1998.

_____. DNER-ME 195/97: **Agregados – determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo**. Rio de Janeiro. 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentação**. 3.ed. – Rio de Janeiro, 2006.

_____. NORMA DNIT 031/2006 – ES: **Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço**. Rio de Janeiro. 2006.

_____. NORMA DNIT 131/2010-ME. **Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola – Método de ensaio**. Rio de Janeiro. 2010.

_____. NORMA DNIT 155/2010-ME: **Material asfáltico – Determinação da penetração – Método de ensaio**. Rio de Janeiro. 2010.

_____. NORMA DNIT 136/2010 – ME: **Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio**. Rio de Janeiro. 2010.

DWIVEDI, Aakash; JAIN, Manish Kumar. **Fly ash – waste management and overview: A Review**. Department of Environmental Science and Engineering. India, 2014.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2019**. Rio de Janeiro. 2019.

INSTITUTO DE ASFALTO. **Manual de Asfalto**. Série do manual no. 4. 1989.

ISAIA, Geraldo Cechella. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. 2v.

JARRIGE, A. **Les cendres volantes: propriét'es, applications industrielles**. Paris, Eyrolles. 1971.

KALKREUTH, W. D.; *et al.* **Avaliação dos impactos ambientais das cinzas pesadas e leves provenientes da Usina Termelétrica de Figueira, Paraná**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

KIHARA, Yushiro. **O estudo mineralógico das cinzas volantes brasileiras: origem, características e qualidade**. Tese de Doutorado. São Paulo, 1983.

LIAO, Min-Chih; AIREY, Gordon; CHEN, Jian-Shiuh. **Mechanical Properties of Filler-Asphalt Mastics**. International Journal of Pavement Research and Technology. Vol.6. No.5. 2013.

MEDINA; Jacque de; MOTTA, Laura Maria Goretti da. **Mecânica de Pavimentos**. 2005.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J.M.. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

Ministry of Environment and Forests. **Fly Ash Notification 2016**. New Delhi, 2016.

MISTRY, Raja; ROY, Tapas Kumar. **Effect of using fly ash as alternative filler in hot mix asphalt**. Perspectives in Science. 2016.

MMA. **Plano de gestão de resíduos sólidos: manual de orientação**. Ministério do Meio Ambiente. Brasília, 2012.

MME. **Resenha Energética Brasileira: exercício de 2018**. Ministério de Minas e Energia. Brasília. 2019.

MONTEIRO, José Henrique Penido; *et al.* **Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos sólidos**. Coordenação técnica Victor Zular Zveibil. Rio de Janeiro: IBAM, 2001.

MORAIS, Luciano Cardoso de. **Estudo sobre o panorama da energia elétrica no Brasil e tendências futuras**. São Paulo, 2015.

NASCIMENTO, S. C; HYPOLITO, R.; RIBEIRO, A. A. **Disponibilidade de metais pesados em aterro de indústria siderúrgica**. Eng. Sanit. Ambient. Vol. II – N°3. 2006.

PANDEY, V. C.; ABHILAH, P.C.; SINGH, N. **The Indian perspective of utilize ing fly ash in phytoremediation, phytomanagement and biomass production**. Journal of Environmental Management. 2009.

PATIL, Suhas V.; NAWLE, Suryankant C.; KULKARNI, Sunil J. **Industril Applications of Fly ash: A Review**. International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR). Volume 2, Issue 9, September 2013.

REMME, B. W; *et al.* **Fly Ash – An Important Ingredient for use in Hot-Mix ASHphalt Concrete**. Fourth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies. Las Vegas, 2016.

- ROHDE, G. M.; MACHADO C. S. **Quantificação das Cinzas de Carvão Fóssil Produzidas no Brasil**. Porto Alegre: Cientec, 2016.
- SANTOS, Maria Cecília Loschiavo dos Santos; DIAS, Sylmara Lopes Francelino Gonçalves. **Resíduos sólidos urbanos e seus impactos**. São Paulo: IEE-USP, 2012.
- SILVA, Leonardo Jordão da. **Processo de Landfarming para Tratamento de Resíduos Oleosos**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2009.
- SUSHIL, Snigdha; BATRA, Vidya. **Analysis of Fly Ash Heavy Metal Content and Disposal Thermal Power Plants in India**. Fuel. v. 85. n. 12. p. 2676-2679, 2006.
- TAYL, Sady Abd; JABR, Aqeel Raheem. **The Effect of Filler Type on the Hot Mix Asphalt Behavior**. Eng. & Tech. Journal, Vol. 29, No.9. 2011.
- TOLMASQUIM, Maurício T.; GUERREIRO, Amilcar; GORINI, Ricardo. **Matriz Energética Brasileira: uma prospectiva**. 2007.
- US EPA. United States Environmental Protection Agency. **Introduction to Phytoremediation**. EPA/600/R-99/107. Washington DC, 2000
- VENTURA FILHO, Altino. **O Brasil no contexto Energético Mundial**. Brasília. 2009.