



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIAS E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL

ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS LATERÍTICOS EM MISTURAS
ASFÁLTICAS

Nathália Silva de Araújo

Orientadora: Prof^ª Dra. Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena

Coorientadora: Gabryelle Keith Avelino Cruz

CAMPINA GRANDE-PB

2018

NATHÁLIA SILVA DE ARAÚJO

ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS LATERÍTICOS EM MISTURAS
ASFÁLTICAS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal de Campina
Grande, como requisito obrigatório para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^ª Dra. Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena

Coorientadora: Gabryelle Keith Avelino Cruz

CAMPINA GRANDE-PB

2018

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Graça e Izaias, que a todo momento me apoiaram nas minhas escolhas, priorizaram a minha educação e sempre me fizeram acreditar ser capaz de conquistar os meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelas bênçãos derramadas em minha vida. Pela força que me transmite todos os dias e por não me deixar desistir dos meus sonhos.

Aos meus pais, Graça e Izaias, por todos os ensinamentos ao longo dos anos, por serem pais maravilhosos e sempre estarem presentes em minha vida. Agradeço por terem passado por momentos de dificuldade e nunca terem desistido de ajudar a realizar o sonho de me Formar.

A minha mãe, toda a admiração por ser essa pessoa guerreira, que mesmo depois de ter seus dois filhos se formou em Pedagogia. Agradeço infinitamente a essa pessoa que em sua infância passou por muitas dificuldades, não teve oportunidade de estudar quando jovem, mas nunca mediu esforços para que eu conseguisse ser Engenheira Civil. Obrigada por fazer parte da minha vida.

Ao meu Pai, por ser esse exemplo de pessoa. Agradeço pelos pelas broncas e pelos ensinamentos.

Ao meu irmão Iury por ter compartilhado a vida comigo e pelos momentos felizes vividos.

Aos meus avós maternos, Diva e Valdemiro, por todo amor que sempre dedicaram e pelo exemplo de pessoas honradas.

A minha avó paterna, Izaura (*in memoria*), pelas boas lembranças e pelo exemplo de família que construiu. Minha Saudade.

A minha família, aqueles que sempre estiveram presentes em minha vida.

Ao meu namorado, Artur, por ter sempre me ajudado nessa caminhada desde o princípio e por sempre ter me dado força para continuar. Obrigada também pelo tempo dedicado em me fazer feliz.

A minha orientadora, Lêda, pela disponibilidade, pela paciência nas orientações do TCC, pelos conhecimentos transmitidos e por toda a trajetória de ensinamentos durante o curso de Engenharia Civil. Muito obrigada.

A minha coorientadora, Gabryelle, pela paciência, pelos conhecimentos transmitidos, pelo tempo dedicado nas correções do TCC e por ter sempre tirado minhas dúvidas mais insignificantes com toda humildade. Obrigada Gaby pelo empenho em me ajudar.

Aos professores da UFCG, pelos ensinamentos.

A todas as pessoas que não foram citadas e que torceram pela minha vitória.

Obrigada!

RESUMO

O agregado granítico é muito utilizado na indústria da pavimentação devido às suas propriedades satisfatórias de resistência e durabilidade. No entanto, em algumas regiões, a exemplo do Norte do Brasil, há escassez de agregado granítico e o custo com do transporte deste (da região de origem até a obra) o encarece e torna inviável sua utilização. Neste caso, a solução é adotar o material existente na região. As concreções lateríticas são encontrados em quase todo Brasil por ser um solo típico de regiões tropicais. Esta pesquisa teve por objetivo investigar a utilização de laterita em misturas asfálticas em substituição aos agregados tradicionalmente utilizados. Para atingir o fim proposto foram realizados ensaios de caracterização do CAP50/70 e dos agregados e ensaios mecânicos com as misturas asfálticas. A dosagem das misturas foram realizadas de acordo com a metodologia do *SUPERPAVE*. Os resultados mostraram que o agregado laterítico possui alta porosidade, baixa durabilidade e adesividade ao ligante. No entanto, as características apresentadas nas misturas asfálticas com agregado laterítico mostraram-se satisfatórias para maioria dos ensaios, como por exemplo, os ensaios de RT, estabilidade Marshall e MR. Conclui-se que apesar do agregado laterítico apresentar características individuais insatisfatórias, esse agregado pode ser utilizado em misturas asfálticas, sendo uma fonte alternativa para pavimentação para regiões na qual haja escassez do agregado granítico.

PALAVRAS-CHAVE: Laterita. Agregado Granítico. Pavimentação. Fonte alternativa.

ABSTRACT

Granite aggregate is widely used in the paving industry because of its satisfactory properties of strength and durability. However, in some regions, such as northern Brazil, there is a scarcity of granitic aggregates and the cost of transportation of the granite aggregate (from the region of origin to the work) makes it more expensive and makes its use impracticable. In this case, the solution is to adopt the existing material in the region. Lateritic concretions are found in almost all of Brazil as a soil typical of tropical regions. The objective of this research was to investigate the use of laterite in asphalt mixtures, replacing the traditional aggregates. In order to reach the proposed end, characterization tests of the CAP50 / 70 and of the aggregates and mechanical tests with the asphalt mixtures were carried out. The dosage of the mixtures were performed according to the SUPERPAVE methodology. The results showed that the lateritic aggregate has high porosity, low durability and tackiness to the binder. However, the characteristics presented in the asphalt mixtures with lateritic aggregate proved to be satisfactory for most of the tests, as for example the RT, Marshall and MR stability tests. It is concluded that although the lateritic aggregate presents individual characteristics unsatisfactory, this aggregate can be used in asphalt mixtures, being an alternative source for paving for regions in which there is scarcity of the granite aggregate.

KEYWORDS: Laterite. Granite aggregate. Paving. Alternative source.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Agregado granítico a) Brita 9,5 mm b) Brita 19 mm.....	29
Figura 2: Agregado laterítico a) Laterita 9,5 mm b) Laterita 19 mm.....	30
Figura 3: Areia.....	30
Figura 4: Pó de pedra.....	30
Figura 5: CAP 50/70.....	31
Figura 6- Fluxograma das atividades de pesquisa.....	32
Figura 7: UTM-25.....	42
Figura 8: AMPT.....	43
Figura 9: Curva granulométrica dos agregados.....	45
Figura 10: Imersão da mistura asfáltica não compactada em água.....	48
Figura 11: Agregados (granítico e laterítico) após a retirada da água.....	48
Figura 12: Curva Fuller intermediária do Agregado granítico.....	49
Figura 13: Curva Fuller intermediária do Agregado laterítico.....	50
Figura 14: Resultado do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	51
Figura 15: Resultado do Flow number.....	52
Figura 16: Resultado do ensaio Cântabro.....	53
Figura 17: Gráfico do ensaio de fadiga x diferença de tensões para misturas asfálticas.....	54
Figura 18: Resultado do ensaio Lottman.....	55
Figura 19: Resultado do ensaio de Estabilidade Marshall.....	55
Figura 20: Resultado do ensaio de MR para misturas asfálticas.....	56
Figura 21: Gráfico de MD para misturas asfálticas com brita granítica.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores encontrados de teor ótimo de ligante.....	38
Tabela 2: Resultado do ensaio de massa específica e absorção dos agregados.....	45
Tabela 3: Resultado do ensaio de índice de forma.....	46
Tabela 4: Resultados do ensaio de abrasão “Los Angeles”	46
Tabela 5: Resultado do ensaio de durabilidade.....	47
Tabela 6: Resultado do ensaio de Equivalente areia.....	47
Tabela 7: Resumo dos resultados com o CAP 50/70.....	48
Tabela 8: Volumetria da dosagem com o agregado granítico.....	50
Tabela 9: Traço da mistura de projeto.....	50
Tabela 10: Volumetria da dosagem Agregado Laterítico.....	50
Tabela 11: Traço da mistura de projeto.....	51
Tabela 12: Valores mínimos de Flow number para diferentes níveis de tráfego.....	53

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVOS	13
1.1.1 OBJETIVO GERAL	13
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 MISTURAS ASFÁLTICAS.....	14
2.1.1 CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO (CAP).....	16
2.1.2 AGREGADOS PARA MISTURAS ASFÁLTICAS.....	17
2.1.3 MATERIAIS ALTERNATIVOS PARA PAVIMENTAÇÃO.....	21
2.1.3.1 AGREGADO LATERÍTICO.....	23
2.1.4 DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS.....	27
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
3.1 MATERIAIS.....	29
3.1.1 AGREGADO.....	29
3.1.2 FÍLER.....	31
3.1.3 LIGANTE.....	31
3.2 MÉTODOS.....	31
3.3 ENSAIOS REALIZADOS COM AGREGADO.....	32
3.3.1 GRANULOMETRIA.....	32
3.3.2 MASSA ESPECÍFICA E ABSORÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO E MIÚDIO.....	33
3.3.3 ÍNDICE DE FORMA.....	34
3.3.4 ABRASÃO LOS ANGELES.....	34
3.3.5 DURABILIDADE.....	35
3.3.6 EQUIVALENTE AREIA.....	35
3.3.7 ADESIVIDADE.....	35
3.4 CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE.....	36
3.4.1 PENETRAÇÃO.....	36
3.4.2 PONTO DE AMOLECIMENTO.....	36
3.4.3 VISCOSIDADE ROTACIONAL.....	36
3.4.4 RTFO.....	37
3.5 DOSAGEM.....	37
3.6 ESTUDOS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS.....	38
3.6.1 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	38
3.6.2 FLOW NUMBER.....	39
3.6.3 CÂNTABRO.....	39
3.6.4 RESISTÊNCIA AOS DANOS A FADIGA.....	39
3.6.5 LOTTMAN.....	40
3.6.6 ESTABILIDADE MARSHALL.....	41
3.6.7 MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	41
3.6.8 MÓDULO DINÂMICO.....	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
4.1 AGREGADOS.....	44
4.1.1 GRANULOMETRIA.....	44
4.1.2 MASSA ESPECÍFICA E ABSORÇÃO.....	45
4.1.3 ÍNDICE DE FORMA.....	46

4.1.4 ABRASÃO LOS ANGELES.....	46
4.1.5 DURABILIDADE.....	47
4.1.6 EQUIVALENTE AREIA.....	47
4.1.7 ADESIVIDADE.....	47
4.2 LIGANTE.....	48
4.3 DOSAGEM.....	49
4.4 MISTURAS ASFÁLTICAS.....	51
4.4.1 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	51
4.4.2 FLOW NUMBER.....	52
4.4.3 CÂNTABRO.....	53
4.4.4 RESISTÊNCIA AOS DANOS A FADIGA.....	54
4.4.5 LOTTMAN.....	54
4.4.6 ESTABILIDADE MARSHALL.....	55
4.4.7 MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	56
4.4.8 MÓDULO DINÂMICO.....	56
5 CONCLUSÕES	58
REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

Conforme dados da Confederação Nacional de Transportes (CNT) de 2017 o Brasil possui uma malha viária de cerca de 1,7 milhões de quilômetros de extensão, dos quais cerca de 211 mil é pavimentado, representando cerca de 13% do total. Ainda segundo a mesma pesquisa cerca de 61% do transporte de cargas e passageiros ocorre pelo sistema rodoviário. Isto é, as rodovias, atualmente, representam o principal meio de transporte do país. As deficiências encontradas na infraestrutura do país é uma barreira ao desenvolvimento eficiente da logística, somada a grande dependência do transporte rodoviário, apesar da má qualidade das rodovias brasileiras.

Leal (2013) afirma que o crescimento da quantidade de veículos em circulação nas rodovias associado ao aumento do peso e do número de eixos dos veículos comerciais têm levado à deterioração precoce dos revestimentos asfálticos, em razão do déficit no controle e fiscalização de sobrepeso rodoviário existente no país (CNT, 2017).

Segundo Lavasani *et al.* (2015) o revestimento do pavimento, camada responsável pela transferência de cargas de roda para camadas inferiores (base, sub-base e subleito), é uma parte crítica da estrutura das rodovias por receber as solicitações do tráfego e está submetida diretamente aos fatores ambientais. Deste modo, a qualidade infraestrutura das rodovias é importante para garantir de forma direta aos seus usuários a estabilidade, a segurança, redução em custos operacionais do veículo e conforto aos que nelas trafegam, além de proporcionar o progresso socioeconômico do país e refletir positivamente na qualidade de vida da população.

De acordo com Monthé (2009) os revestimentos asfálticos são constituídos de agregados unidos por um “aglomerante” denominado Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP). O nível de desempenho deste será tanto melhor quanto maior for sua interação com seus constituintes sob diferentes condições de carregamento, de estruturas e de variações sazonais do clima.

Ibrahim *et al.* (2009) afirmam que os agregados na mistura asfáltica estão sujeitos as tensões elevadas devido à ação do tráfego, e isto justifica a necessidade de que o material apresente boa resistência no que diz respeito à desintegração química e à abrasão.

Em relação à produção de agregados para construção civil, Frazão (2010) declara que os agregados necessitam ser produzidos no entorno do local de consumo,

geralmente em áreas urbanas, devido à alta participação do transporte no custo final, que responde por cerca de 1/3 do custo final da areia, e 2/3 do preço final da brita, o que firma a necessidade de ser produzido próximo ao mercado consumidor.

Apesar de no Brasil a maioria dos agregados utilizados para pavimentação asfáltica ser de origem granítica, observa-se que em algumas regiões, como na região Norte, por exemplo, existe a dificuldade de se obter agregados desta natureza, aumentando assim os custos e dificultando a execução dos projetos. No entanto, verifica-se que assim como em outras regiões de clima tropical, há vasta disponibilidade de concreções lateríticas que podem ser britadas e conseqüentemente utilizadas como agregados. Segundo Chagas (2011) o custo de brita de rocha granítica, em algumas localidades no extremo Norte do Brasil, atingem a cifra de 800,00/m³, aproximadamente três vezes do que era pago na época na região de Campina Grande-PB.

Moizinho (2007) relata que a escassez de agregado granítico na região Norte e em outras áreas do país tem motivado os construtores locais a usar de forma indiscriminada, sem controle tecnológico, os solos lateríticos concrecionados e seixos rolados, na confecção de concreto de cimento Portland, mistura asfáltica e como materiais de base e sub-base de pavimentos, dentre outras aplicações. Estes fatos têm motivado engenheiros e pesquisadores a estudarem as propriedades dos solos e concreções lateríticas, para que se possa melhor conhecer o comportamento deste dentro de um grau de segurança compatível com as normas e especificações geralmente adotadas. Por outro lado, sabe-se que esses solos são produtos de um intenso intemperismo físico e químico, o qual é significativamente influenciado pelas mudanças de energia térmica e de energia mecânica. Devido a estes fatores, as propriedades de engenharia dos solos lateríticos e, principalmente, das concreções podem apresentar variações que dificultam o seu uso.

A utilização do agregado laterítico em revestimento asfáltico demanda estudos detalhados, visto que as características desses agregados diferem do agregado granítico convencional. Na literatura atual, pouco está disponível acerca da aplicação de agregados lateríticos em misturas asfálticas, portanto a avaliação dos parâmetros de resistência e qualidade da mistura tem que ser feita a partir dos parâmetros das misturas convencionais já conhecidas e difundidas. Desta forma, o intuito da atual pesquisa é avaliar misturas asfálticas compostas de agregados lateríticos tendo em vista a carência de agregados graníticos em certas localidades do país.

1.1 Objetivos

1.1.1 *Objetivo Geral*

O objetivo geral dessa pesquisa é avaliar a substituição de agregados graníticos por agregados lateríticos em misturas asfálticas.

1.1.2 *Objetivos Específicos*

- avaliar parâmetros físicos dos agregados lateríticos;
- analisar a influência do tipo de agregado na resistência mecânica de misturas asfálticas;
- avaliar o comportamento das misturas ao trincamento por fadiga;
- estudar a resistência às deformações permanentes de misturas compostas com agregados graníticos e lateríticos.

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 Misturas Asfálticas

A mistura asfáltica é responsável por resistir aos esforços ao qual o revestimento é submetido sem comprometer a segurança e conforto dos usuários. Nesta mistura tanto o ligante quanto os agregados são de fundamental importância para a camada de revestimento do pavimento, no entanto ressalta-se que os agregados são os principais responsáveis por suportar os esforços aos quais a mistura é submetida.

Logo, a mistura asfáltica deve ser produzida para atender as características técnicas e econômicas de acordo com as exigências previamente estabelecidas. Portanto de acordo com Lucena (2009) esta mistura deve apresentar as seguintes características:

- resistirem às deformações permanentes;
- resistirem ao fendilhamento por fadiga e por variação térmica;
- terem uma adequada adesividade agregado-mástique que impeça a desagregação;
- serem trabalháveis durante a sua produção, espalhamento e compactação;
- serem duráveis para resistirem ao desgaste do tráfego e aos efeitos do ar e da água;
- serem impermeáveis, para protegerem as camadas inferiores da água da chuva;
- possuírem uma adequada textura superficial;
- causarem um nível de ruído pneu/pavimento reduzido;
- terem boas características ópticas;
- possibilitarem a obtenção de uma superfície regular;
- terem uma manutenção fácil;
- serem de utilização economicamente vantajosa.

Amaral (2004) evidencia que as misturas asfálticas devem ser impermeáveis (para proteção de sua estrutura), trabalháveis (durante o período de fabricação e espalhamento) e apresentarem micro-textura (capaz de conferir aderência pneu/pavimento, principalmente em pavimentos molhados).

Tendo em vista o fato de que os agregados são responsáveis por cerca de 95% da composição das misturas asfálticas é importante avaliar e escolher adequadamente o tipo de agregado e as características destes para que as misturas asfálticas apresentem bom desempenho e durabilidade quando aplicada em campo.

Pazos (2015) afirma que as características de forma de partículas de agregados influenciam de maneira significativa o comportamento global de misturas asfálticas e a sua resistência ao dano. Alguns experimentos são citados na literatura para a caracterização mecânica de misturas asfálticas e podem ser usados para quantificar os efeitos das propriedades morfológicas dos agregados no seu desempenho, tais como: módulo de resiliência, módulo dinâmico uniaxial, flow number, resistência à tração, fadiga e fratura por compressão diametral. Esses ensaios são normatizados por órgãos como a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) e a ASHTO (American Association of State Highway Transportation Officials), e tem o objetivo de avaliar as características de resistência da mistura asfáltica.

Um agregado, para ser utilizado em misturas asfálticas, deve apresentar propriedades físicas e mecânicas consideráveis, como uma alta resistência ao desgaste, uma baixa porosidade e alta massa específica.

Sobre as misturas asfálticas, Lucena (2009) enfatiza que o desempenho do pavimento depende, dentre outros fatores, das propriedades físicas e mecânicas das camadas que o constitui. Entre elas, a camada de revestimento envolve componentes de custo elevado e, devido a isto, fatores que venham a interferir no desempenho da camada devem ter controle rigoroso, como: características dos materiais, dosagem, condições de compactação, processo construtivo e plano de manutenção.

Com o objetivo de obter a qualidade e as propriedades adequadas para o projeto de misturas asfálticas é prudente escolher os materiais de forma proporcional, encontrando uma combinação e graduação de agregados econômica (dentro dos limites pré-estabelecidos) com um teor de asfalto ideal, de forma que a mistura atenda as seguintes características (SOUZA, 2012):

- quantidade de asfalto suficiente para assegurar um pavimento com vida útil adequada;
- estabilidade mecânica que satisfaça a demanda do tráfego sem distorções ou deslocamentos plásticos acima dos limites pré-determinados;
- vazios em quantidade suficiente na mistura compactada de modo a permitir a expansão térmica do asfalto e dos agregados com a variação da temperatura;
- trabalhabilidade da mistura que permita a aplicação adequada da mistura sem segregação dos componentes;
- compatibilidade mecânica, em termos de deformações permanentes e reversíveis, entre as sucessivas camadas da estrutura do pavimento.

O bom desempenho das misturas asfálticas depende da escolha dos materiais que irão compô-la, de uma dosagem em que os grãos consigam ser envolvidos pelo CAP respeitando o volume de vazios mínimo, da trabalhabilidade da mistura final, da correta aplicação em campo, e, posteriormente do monitoramento do pavimento para que ele tenha uma vida útil longa.

2.1.1 *Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)*

O CAP é o responsável pela união dos agregados. A composição química do CAP tem influência no desempenho físico e mecânico das misturas asfálticas, porém quando há adição de agentes modificadores, como por exemplo, os polímeros, o CAP apresenta melhor desempenho nas misturas asfálticas. O CAP é um material dúctil que suporta deformações plásticas consideráveis antes de acontecer à ruptura do material, entretanto a partir de determinados esforços podem ocorrer fissuras na estrutura do CAP, que gradativamente causarão ruptura da mistura asfáltica. Essas são chamadas de deformações permanentes que geralmente são ocasionadas pelo cisalhamento do pavimento.

Os materiais asfálticos foram utilizados na antiguidade como agentes aglutinantes e impermeabilizantes. Há registros antigos do uso de asfalto na mumificação pelos egípcios e na impermeabilização de reservatórios de água pelos mesopotâmios (IBP, 1999).

Os Cimentos Asfálticos possuem três grandes divisões: Cimento Asfáltico Natural (asfalto natural), Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) e os de origem do Alcatrão. Os Cimentos Asfálticos Naturais são depósitos formados pelo petróleo que surgem na superfície da terra e sofrem uma destilação natural pela ação do vento e do sol, que retiram os gases e óleos leves, deixando um resíduo que é o asfalto natural (GRECO, 2006). O alcatrão é produzido pela queima de material orgânico como tabaco, madeira ou carvão. A maioria dos alcatrões utilizados na pavimentação são subprodutos da destilação destrutiva do carvão (DNIT, 1996).

Os petróleos ou óleos crus diferem em suas propriedades físicas e químicas, variando de líquidos negros viscosos até líquidos castanhos bastante fluidos, com composição química predominantemente parafínica, naftênica ou aromática. Existem perto de 1.500 tipos de petróleo explorados no mundo, porém somente uma pequena porção deles é considerada apropriada para produzir asfalto (SHELL, 2003).

Cerca de noventa por cento (90%) dos cem milhões de toneladas anuais de produção de cimentos asfálticos são aplicados na indústria de pavimentação, que misturados aos agregados minerais formam as misturas asfálticas (MOTHÉ, 2009).

Bernucci *et al.* (2008) relata que o CAP é um ligante betuminoso que provém da destilação do petróleo e que tem a propriedade de ser um adesivo termoviscoplastico, impermeável à água e pouco reativo. Essa propriedade de ser um adesivo termoviscoplastico do CAP reflete em seu comportamento mecânico. Entretanto a baixa reatividade química a muitos agentes não impede o seu processo de envelhecimento por oxidação lenta devido ao contato com o ar e a água. Esse processo ocorre também pela sua composição química de 90 a 95% de hidrocarbonetos e de 5 a 10% de heteroátomos (oxigênio, enxofre, nitrogênio e metais, vanádio, níquel, ferro, magnésio e cálcio) unidos por ligações covalentes.

As propriedades físicas do asfalto, geralmente, estão relacionadas à sua temperatura. A estrutura do ligante como uma dispersão de moléculas polares em meio não-polar auxilia na compreensão do efeito da temperatura nos ligantes asfálticos.

Bernucci *et al.*(2008) afirma que o CAP, em temperaturas muito baixas, se comporta quase como um sólido, suas moléculas não têm condições de se mover umas em relação às outras e a viscosidade fica muito elevada nessa situação. À medida que a temperatura vai aumentando, algumas moléculas começam a se mover podendo haver um fluxo entre elas. O aumento do movimento faz a viscosidade baixar e, em temperaturas altas, o ligante se comporta como um líquido, sendo reversível essa transição de estado físico. Um dos critérios mais utilizados de classificação dos ligantes é a avaliação da sua suscetibilidade térmica, por algum ensaio que meça direta ou indiretamente sua consistência ou viscosidade em diferentes temperaturas. A faixa de temperatura correspondente à transição entre sólido e líquido é influenciada pela proporção dos quatro componentes do ligante asfáltico e pela interação entre eles.

2.1.2 Agregados para misturas asfálticas

A escolha de agregados para aplicação em revestimentos asfálticos depende de sua disponibilidade, custo, qualidade e seu tipo de aplicação. De acordo com Roberts *et al.*(1996) são as propriedades físicas dos agregados que determinam principalmente sua compatibilidade para o uso em misturas asfálticas e em menor quantidade as propriedades químicas. Propriedades físico-químicas tais como umidade, adesividade e, em consequência, descolamento da película de asfalto são função da composição e da

estrutura dos minerais no agregado, entre outros fatores. As propriedades químicas dos agregados têm pequeno efeito no seu desempenho, exceto quando afetam a adesividade do ligante asfáltico ao agregado e a compatibilidade com aditivos antidescolamento que podem ser incorporados ao ligante asfáltico.

Sobre as características químicas dos agregados, Bernucci *et al.* (2008) explicam que uma compreensão da mineralogia e a identificação de minerais podem produzir informações sobre propriedades físicas e químicas potenciais de um agregado para um determinado uso, e pode ajudar a evitar o uso de um agregado que tenha constituintes minerais nocivos. A aceitação dos agregados é definida pela análise de determinadas características, devendo-se proceder previamente à coleta de amostras de forma adequada.

Os agregados podem ser classificados quanto à natureza, tamanho e a distribuição de seus grãos. Bernucci *et al.* (2008) falam sobre essa classificação da seguinte forma:

✓ Quanto à natureza:

Natural: Inclui todas as fontes de ocorrência natural e são obtidos por processos convencionais de desmonte, escavação e dragagem em depósitos continentais, marinhos, estuários e rios. São exemplos os pedregulhos, as britas, os seixos, as areias etc. Ou seja, os agregados naturais podem ser empregados em pavimentação na forma e tamanho como se encontram na natureza, ou podem ainda passar por processamentos como a britagem. Os agregados provenientes de rochas naturais pertencem a um de quatro tipos principais, que são ígneos, sedimentares, metamórficos ou areias e pedregulho.

Artificial: São resíduos de processos industriais, como exemplo os vários tipos de escórias, subprodutos da indústria do aço.

Reciclado: Nessa categoria estão os provenientes de reuso de materiais diversos. A reciclagem de revestimentos asfálticos existentes vem crescendo significativamente em importância e em alguns países já é a fonte principal de agregados.

✓ Quanto ao tamanho:

Os agregados são classificados quanto ao tamanho, para uso em misturas asfálticas, em graúdo, miúdo e material de enchimento ou filler (DNIT 031/2004 – ES):

graúdo: é o material com dimensões maiores do que 2,0mm, ou seja, retido na peneira no 10 (britas, cascalhos, seixos etc.);

miúdo: é o material com dimensões maiores que 0,075mm e menores que 2,0mm. O agregado miúdo é o material que fica retido na peneira N°200, mas que passa na de número 10 (areias, o pó de pedra etc.);

material de enchimento (fíler) – é o material onde pelo menos 65% das partículas apresenta diâmetro inferior a 0,075mm, correspondente à peneira 200 (cal hidratada, cimento Portland).

✓ Quanto à distribuição dos grãos:

A distribuição granulométrica dos agregados é uma de suas principais características e efetivamente influi no comportamento dos revestimentos asfálticos. Em misturas asfálticas a distribuição granulométrica do agregado influencia quase todas as propriedades importantes incluindo rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga e à deformação permanente, resistência ao dano por umidade induzida etc. A distribuição granulométrica dos agregados é determinada usualmente por meio de uma análise por peneiramento que é regida pela norma DNIT-ME 035/95.

Algumas características dos agregados são verificadas para que ele possa ser utilizado em uma mistura asfáltica. As propriedades físicas e mecânicas básicas são a resistência à abrasão, a porosidade e a densidade. A resistência à abrasão é uma das propriedades que devem ser analisada de forma minuciosa, pois é um parâmetro que quantifica o quanto um agregado sofre desgaste superficial pelo atrito. No processo de pavimentação, os agregados localizados nas camadas superficiais do pavimento devem apresentar maior resistência à abrasão do que os que estarão localizados em camadas inferiores. A porosidade do agregado é um fator que pode dificultar na dosagem da mistura, já que quanto mais poroso for, mais ligante esse agregado vai consumir para recobrimento das partículas. A massa específica do agregado é de fundamental importância para a estimativa do teor de asfalto na mistura e posteriormente determinação do teor ótimo de ligante.

Devido a cerca de 95% da mistura asfáltica ser composta de agregados, eles merecem uma atenção especial. Os agregados usados na fabricação de misturas asfálticas devem, em geral, possuir as seguintes características: dureza, resistência, durabilidade, distribuição de tamanhos de partículas (granulometria) apropriada, forma preferencialmente cúbica e baixa porosidade. Essas propriedades são tipicamente caracterizadas a partir de testes laboratoriais, seguindo um roteiro de ensaios presentes em normas específicas.

Algumas características como o tamanho dos agregados, sua forma e textura desempenham papel fundamental nas misturas asfálticas. O tamanho dos agregados, por exemplo, tem consequência direta sobre a densidade, o volume de vazios e a trabalhabilidade das misturas asfálticas. A textura mais rugosa destes aumenta a estabilidade das misturas asfálticas e amplia a sua homogeneidade.

No Brasil, o agregado granítico é o mais utilizado devido as suas propriedades serem adequadas para composição de misturas asfálticas. Entretanto, outros tipos de agregado também estão disponíveis em jazidas em todo o território nacional, dos quais pode-se destacar o agregado laterítico que está presente em grande escala na região norte do Brasil, onde há escassez de jazidas de agregado granítico.

Moizinho (2007) destaca que no território brasileiro há ocorrência de extensas áreas de formações lateríticas, principalmente na região Norte, que pode fornecer uma fonte alternativa de agregados para construção. Na região Amazônica, por exemplo, onde mais da metade da área é coberta por uma espessa camada de sedimentos quaternários e terciários não consolidados, são poucas as ocorrências de agregado granítico. Quase todas as jazidas estão situadas em regiões de difícil acesso, afastadas dos centros consumidores e com severas restrições ambientais de exploração. Isso exige, muitas vezes, o transporte aquaviário de brita a distâncias de até 3.000 km - como em algumas cidades do estado do Acre - utilizando-se infra-estrutura de transportes precária e ineficiente.

A escassez de agregados gera um aumento considerável nos custos da construção civil na região Norte, tornando economicamente atraente a produção de agregado artificial com o uso de matéria prima local. A maioria das obras de construção rodoviária na região amazônica está incluída nesse contexto (MOIZINHO, 2007).

Oposto a essa escassez de agregados graníticos surge, como citado anteriormente, a abundância de jazidas de materiais de origem laterítica, que pode ser uma alternativa para substituição do agregado granítico e redução de custos.

O agregado laterítico apresenta algumas propriedades morfológicas importantes, como uma alta massa específica, desgaste por abrasão mais elevado do que o agregado granítico e alta absorção, que aparece como desvantagem. Normalmente agregados que apresentem alta porosidade são descartados, excluindo-se os casos em que eles possuam qualidades e/ou propriedades adicionais que justifiquem o uso.

Apesar de apresentar alta absorção, diferente dos agregados graníticos, nesta pesquisa, o agregado laterítico é apresentado como alternativa à escassez de agregados

de outra espécie em determinadas regiões do país. Ou seja, neste âmbito é plausível considerar que os custos com maior absorção de ligante são compensados quando considerados os custos com transporte de material de uma região para outra.

Desta forma, a utilização de misturas asfálticas utilizando o CAP e agregados lateríticos é uma alternativa para utilização mais racional dos recursos naturais disponíveis, diminuindo assim custos onde o agregado granítico é escasso, ou exige grande distância de transportes, contribuindo também para a preservação do meio ambiente e economia.

2.1.3 *Materiais alternativos para pavimentação*

O crescente aumento da malha viária brasileira (CNT, 2017) aliada à falta de pavimentação das rodovias, que chega a ser 78,5% da malha rodoviária total, reflete uma realidade de carência de pavimentação das rodovias nacionais.

Deste modo, tanto o custo quanto à escassez de recursos naturais limitam a pavimentação de rodovias, principalmente as de baixo volume de tráfego. Uma forma de viabilizar economicamente a pavimentação destas é a utilização de materiais locais e alternativos aos materiais tradicionais que são utilizados atualmente.

Em vista disso, foram desenvolvidas algumas pesquisas [Freitas & Motta (2008), Pazos *et al.* (2015) e Assis (2015)] com misturas asfálticas realizando a substituição do agregado granítico, que é o mais utilizado no Brasil, por agregados oriundos de fontes alternativas.

Freitas & Motta (2008) avaliaram o uso de escória aciaria em misturas asfálticas de módulo elevado. Nesta pesquisa os autores justificam a escolha pelo fato de que a mistura asfáltica com escória aciaria apresenta menor frequência de manutenção, e, conseqüentemente promove a redução de custos. Além disso, o uso da escória reduz os danos ao meio ambiente, tendo em vista que a cada tonelada de aço que é produzida há a geração de cerca de 140 kg de escória que se acumulam nos pátios das siderúrgicas e que devem apresentar um descarte adequado.

Nesta pesquisa, Freitas & Motta (2008) chegaram a conclusão que a mistura com escória aciaria, de uma siderúrgica no Espírito Santo, apresentou valores de módulo de resiliência superiores em cerca de 17% às misturas com o agregado granítico, valor 12% superior nos ensaios de resistência a tração por compressão diametral e valores tão bons quanto as misturas com agregado convencional para os ensaios de deformação

permanente por compressão axial e ensaio de fadiga. Apesar desse tipo de mistura necessitar de uma quantidade superior de ligante, o custo final deve ser levado em consideração para cada caso (avaliando a distância de transporte, o preço do agregado e a contribuição ambiental).

A pesquisa de Pazos *et al.* (2015) apresentam o seixo rolado como outro tipo de agregado utilizado em alternativa ao agregado granítico. O objetivo desse estudo foi avaliar o comportamento global da mistura asfáltica dosadas com diferentes proporções de seixo rolado e agregado granítico. Neste estudo foram utilizados nas misturas asfálticas: brita lamelar, brita cúbicas, 75% de brita e 25% de seixo, 25% brita e 75% de seixo e apenas seixo rolado.

Em relação aos resultados encontrados por Pazos *et al.* (2015), para valores de módulo de resiliência, apenas a misturas com proporção de 50% brita e 50% seixo apresentaram valores abaixo do que a norma preconiza. Em relação ao módulo dinâmico, as misturas de brita e seixo apresentaram valores superiores a misturas asfálticas só com o seixo, podendo indicar que a presença de material mais cúbico na composição de misturas contendo brita e seixo rolado gerou um melhor intertravamento das partículas do que quando utilizando só seixo. Os resultados do ensaio flow number, evidenciaram a forte relação entre propriedades de textura de agregados graúdos e a sua resistência a este tipo de dano, tendo em vista que a correlação entre a textura do agregado e sua resistência afetam significativamente as características estruturais dos pavimentos. De maneira geral, as combinações do seixo rolado e da brita, de característica mais cúbica, resultaram em misturas com desempenho similar ou superior ao de misturas asfálticas contendo somente agregado britado lamelar.

Assis (2015) pesquisou o uso de agregado de rocha calcária em misturas asfálticas. O objetivo da pesquisa realizada foi de avaliar o uso dos agregados de rocha calcária em misturas asfálticas para ser utilizada em camada de rolamento. No estudo foram feitas substituições do pó de pedra oriundo do agregado granítico e inclusão do filer mineral. Os materiais utilizados para realização dos ensaios foram o agregado granítico (nas frações de brita 19, brita 12 e pó de pedra), o agregado da rocha calcária (pó de pedra e filer mineral) e CAP 50/70. Os corpos-de-prova para realização dos ensaios foram moldados pelo método Marshall e SUPERPAVE para análise da influência do tipo de compactação no desempenho mecânico da mistura asfáltica.

De acordo com os resultados obtidos por Assis (2015) ocorreu um alto percentual de absorção no agregado calcário, implicando em maior consumo de CAP. Nos resultados de estabilidade Marshall, verificou-se um maior valor de resistência nas misturas com incorporação do agregado calcário, o que atesta sua viabilidade de uso. As misturas com a presença de calcário apresentaram maior resistência à tração, tendo seu maior valor alcançado quando dosados pelo método Marshall. Em relação ao módulo de resiliência, as misturas com substituição do pó de pedra granítico pelo pó de pedra calcário e com a incorporação de filler mineral na mistura apresentaram valores superiores em cerca de 20% nos corpos-de-prova que foram compactados pelo método Marshall. Deste modo, a pesquisa feita por Assis (2015) evidenciou que a substituição parcial de agregados graníticos por agregados de calcário pode melhorar o desempenho de misturas asfálticas.

2.1.3.1 Agregados lateríticos

O termo laterita foi utilizado em 1807 pelo geógrafo inglês Buchanann, nas regiões montanhosas da costa do Malabar no sul da Índia. O termo laterita deriva-se do latim later=tijolo, e foi designado para nomear um material de aspecto argiloso sem estratificação, extremamente poroso, rico em cavidades e que possuía grandes quantidades de ferro na forma de óxidos e hidróxidos. A coloração amarela-avermelhada era típica desse material, que podia ser facilmente cortado com um canivete, mas que em contato com o ar, sofria um notável endurecimento, de maneira irreversível, produzindo um excelente material para construção.

Para Guimarães e Motta (2000) denomina-se no meio rodoviário brasileiro de laterita um solo concrecionado enriquecido com óxidos hidratados de ferro ou alumínio, tendo a caulinita como argilo-mineral predominante, com coloração vermelha, amarela, marrom ou alaranjada.

De acordo com Santos (2004) solos lateríticos são solos superficiais, típicos das partes bem drenadas das regiões tropicais úmidas, resultantes de uma transformação da parte superior do subsolo pela atuação de intemperismo, por um processo chamado de laterização.

O conceito de solos lateríticos dado por Spindola e Daniel (2008) trata de caracterizá-los como depósitos residuais da crosta terrestre com origem nos acúmulos, relativos e absolutos, de materiais resistentes as intempéries.

A Geologia define laterita como o produto do processo de laterização, estas que são formações superficiais ou subsuperficiais ferruginosas e aluminosas endurecidas, que se formam em regiões tropicais ou subtropicais. Quando se acumulam em grande quantidade formam uma camada superficial resistente que recebe o nome de canga laterítica, carapaça laterítica ou crosta laterítica.

Santos (2004) afirma que as características mais importantes desse processo de laterização são o aumento da quantidade de óxido de ferro e/ou alumínio e a permanência de caulinita, como argilo-mineral. Graças a estes elementos é que se observa a coloração típica dos solos com comportamento laterítico: vermelho, amarelo, marrom e alaranjado.

A Laterita é uma rocha formada ou em fase de formação por meio de intenso intemperismo químico de rochas já existentes, inclusive de laterita antiga, sob condições tropicais, ou equivalentes. Sua composição química é rica em Fe e Al, e pobre em Si, K e Mg, comparando com a rocha que lhe deu origem.

A laterita é vantajosa como produto alternativo por estar presente em solos de regiões tropicais e subtropicais da Terra. No território brasileiro, a laterita é encontrada nos solos ditos como latossolos, podzólico e terra roxa e solos lixiviados sob a floresta. Cerca de 40% das terras emersas do Globo são recobertas por latossolo, e no Brasil, os latossolos recobrem em torno de 65% da área total do país (CHAGAS FIHO, 2005).

Oliveira *et al.* (2011) afirmam que a regiões do Norte do país apresentam carência de brita granítica, material tido como ótimo para uso como agregado graúdo em obras de pavimentação. Entretanto estas regiões, assim como em regiões de outros países de clima tropical, apresentam abundância de rochas lateríticas. A substituição do agregado graúdo, tradicionalmente utilizado, pelo laterítico poderia vir a reduzir os custos, principalmente de transporte, relativos à importação da brita granítica de outras regiões do país, contribuindo para diminuição do valor do produto final (mistura asfáltica).

A Associação Brasileira de Pavimentação (ABPv), desde 1976, considera a laterita um material aprovado para utilização em camadas de base, sub-base e revestimento primário, informando também que as primeiras experiências com esse agregado aconteceram em 1953 nos estados do Pará e Maranhão, e menciona exemplos importantes do uso da laterita em pavimentação nas rodovias Belém-Brasília e na transamazônica, ambos em meados da década de setenta. Alhassan (2008) diz que os

solos lateríticos são comumente utilizados em camadas de base e sub-base de rodovias devido a apresentarem grande vantagem, já que se mostram não expansivos.

Amu *et al.*(2011) afirmam que o comportamento das lateritas em pavimentos depende, além do tráfego ao qual está sujeito e das condições ambientais, das características granulométricas, da natureza e resistência da fração grossa, assim como do grau de compactação. A utilização de lateritas mais duras é, em princípio, adequada para bases, enquanto que as lateritas menos duras servirão para sub-bases, assim como os solos lateríticos de melhor qualidade.

Dutra (2014) declara que a utilização de solos lateríticos em pavimentos surge como uma alternativa econômica, pelo que nas últimas décadas têm sido estudados e caracterizados para que se possa proceder à correta e segura utilização dos mesmos. O uso das lateritas para este propósito funciona satisfatoriamente se as características especiais deste tipo de solo estiverem bem estudadas e reconhecidas. Para tal, é necessário proceder ao reconhecimento geotécnico, testando o solo e seguindo as normas adequadas.

Algumas características do agregado laterítico se distanciam das encontradas do agregado granítico como, por exemplo, uma alta absorção e uma baixa resistência à abrasão Los Angeles. A alta absorção do agregado laterítico faz com que este absorva maior quantidade de CAP, sendo um ponto desfavorável desse tipo de agregado. Entretanto esse agregado apresenta abundância em algumas regiões em que o agregado granítico não tem tanta disponibilidade e viabilidade econômica, que é um ponto positivo desse agregado. Apesar da laterita apresentar alto índices de vazios e por esse motivo baixa capacidade de suporte, após a sua compactação apresentam ampla utilização como materiais de construção em barragens de terra, e, principalmente em pavimentação, onde esse agregado é empregado nas camadas de fundação de pavimento, como base e sub-base e em revestimento asfáltico (MARTINÉZ *et al.*, 2002).

Alguns estudos recentes como o de Amaral (2004), e Costa *et al.*(2016) sobre a utilização da laterita mostraram resultados satisfatórios quanto à utilização desse agregado em mistura asfáltica, mostrando ser um material de grande potencial para ser utilizada em alternativa a brita granítica.

Amaral (2004) realizou ensaios com misturas asfálticas utilizando laterita da região metropolitana de Belém do Pará. A pesquisa da autora tinha o objetivo avaliar o desempenho de misturas asfálticas usinadas com concreções lateríticas lavadas e do

refugo da laterita para o uso em camadas de pavimento. Amaral (2004) fez ensaios com os seguintes materiais: CAP 50/70, IPIPEN 60/25 e IMP 5, seixo de rio, areia natural, fíler de calcário e concreções lateríticas.

As misturas com IPIPEN 60/25 (ligante asfáltico modificado por asfaltita) e com agregados de granulometria A (Concreções lateríticas, areia natural e fíler de calcário na faixa C do DNIT) obtiveram melhores resultados nos ensaios Marshall, resistência à tração, módulo de resiliência e de fadiga por compressão diametral. Em termos de deformação permanente, a mistura asfáltica de agregados de granulometria B (Concreções lateríticas, seixo de rio, areia natural e fíler de calcário na faixa 12,5 da metodologia *Superpave*) com CAP 50/60 apresentou menores deformações. De acordo com os parâmetros franceses a mistura de IPIPEN 60/25 com agregados de granulometria A seria aceitável para rodovias de baixo volume de tráfego, atingindo assim um dos objetivos da pesquisa.

A análise de Amaral (2004) demonstrou resultados em que o agregado laterítico pode ser utilizado em rodovias de baixo volume de tráfego e conseqüentemente pode ser empregado na região de Belém, onde muitos projetos de vias urbanas são inviabilizados pelos altos custos de transporte de material, como por exemplo, o da brita, que chega a ter uma distância de transporte ser de 200 km da cidade de Belém.

Costa *et al.* (2016) realizaram ensaios que utilizou tanto o agregado laterítico quanto o granítico em misturas asfálticas. Os autores realizaram ensaios para caracterização do ligante, dos agregados, e, posteriormente foram moldados corpos de provas e realizados ensaios para obtenção das propriedades mecânicas das misturas. Com relação aos resultados laboratoriais obtidos, destaca-se que na moldagem dos corpos-de-prova utilizando a laterita observou-se uma dificuldade no envolvimento do agregado com o CAP, relacionado à alta absorção da laterita, que por ser um material muito poroso necessita de um maior teor de CAP para o completo envolvimento das partículas. Esse fato pode implicar em um encarecimento do pavimento utilizando este tipo de agregado, devido à elevação no consumo do ligante asfáltico.

Os resultados obtidos por Costa *et al.* (2016) dos ensaios de Abrasão Los Angeles e Cântabro foram maiores nas misturas com laterita, mesmo assim apresentam valores dentro do que a norma permite. Apesar das propriedades físicas, mecânicas e de adesividade do agregado laterítico estudado por Costa *et al.* (2016) serem inferiores as da brita granítica, estas não influenciaram significativamente as propriedades mecânicas das misturas asfálticas produzidas com o agregado laterítico. Entretanto, os autores

destacam a necessidade do uso de melhoradores de adesividade e/ou um maior teor de CAP nas misturas asfálticas, devido a grande absorção do agregado.

Entende-se, de acordo com os estudos já realizados, a utilização de agregado laterítico em misturas asfálticas usinadas à quente em substituição ao agregado granítico é possível, mas necessita-se investigar as propriedades dos solos lateríticos e suas concreções a fim de verificar adequadamente sua aplicabilidade.

2.1.4 Dosagem das misturas asfálticas

O teor de CAP de uma mistura asfáltica depende do método de dosagem utilizado, que devem estabelecer as relações dos ensaios, realizados em laboratório, e os dos resultados colhidos em campo. O método Hveem, o método Marshall, o método Triaxial de Smith e o método SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavement) são os mais conhecidos. O último é oriundo de uma série de estudos realizados nas décadas de 1980 e 1990 que ficou conhecido como Strategic Highway Research Program (SHRP).

A metodologia mais utilizada mundialmente é a dosagem Marshall que foi desenvolvida em meados de 1940 pelo engenheiro Bruce Marshall (EUA). A dosagem Marshall é orientada pela norma brasileira DNIT-ME 043/95. O ensaio consiste em produzir corpos-de-prova com massas específicas similares às das misturas asfálticas compactadas em campo e rompe-los por tração diametral com um molde específico denominado Marshall.

Segundo Bernucci *et al.* (2008) em 1980 várias rodovias norte-americanas de tráfego pesado evidenciaram deformações permanentes prematuras. Acreditava-se que a compactação por impacto (golpes) das misturas durante a dosagem produzia corpos-de-prova com densidade que não condizia com as do pavimento em campo. Estudos nos Estados Unidos sobre materiais asfálticos resultaram em uma nova dosagem, intitulada SUPERPAVE, que ainda está em fase de teste no Brasil.

Lucena (2009) afirma que o procedimento de dosagem desenvolvido no Programa SUPERPAVE surgiu nos Estados Unidos no final dos anos 80 como resultado do Programa SHRP (Strategic Highway Research Program). Ele é baseado em especificações estabelecidas para os agregados e nas proporções volumétricas da mistura asfáltica. Por sua vez, as misturas são “projetadas” com o auxílio de parâmetros relacionados com as propriedades físicas, químicas e mecânicas dos agregados, bem

como pela relação volume de vazios, volume de CAP e volume de agregado. Uma das exigências da metodologia SUPERPAVE diz respeito à distribuição dos tamanhos de grãos, onde a granulometria é abordada de forma diferente da tradicional. Usa-se a curva proposta por Fuller e Thompson em 1907 para lançar em gráfico a distribuição dos diferentes tamanhos das partículas dos agregados que irão compor a mistura no nível 1.

A dosagem pelo SUPERPAVE estima um teor de ligante provável de projeto por meio do volume de vazios e da granulometria do agregado disponível. A maior diferença entre este procedimento e o Marshall é a forma de compactação. A Marshall é realizada por impactado e a dosagem feita pelo SUPERPAVE é feita por amassamento. No procedimento do SUPERPAVE consideram-se três níveis de projeto dependendo do tráfego. A mistura é feita utilizando-se um equipamento portátil chamado CGS. Essa dosagem considera tanto as cargas estáticas quanto as cargas móveis que atuam no pavimento, já o método Marshall só considera as cargas dos eixos dos veículos atuantes no pavimento, deixando de considerar a fadiga, que é um fator de grande importância. O processo de dosagem de misturas asfálticas desenvolvido no programa SHRP é analisado faixas de temperaturas do CAP que intencionam simular as etapas do processo de mistura, espalhamento e compactação, de modo que estejam associadas às temperaturas do pavimento ao longo da vida útil do trecho onde ele será construído.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritos os materiais e especificações utilizadas para caracterização dos agregados, do CAP e da mistura asfáltica.

Os procedimentos serão realizados de acordo com as especificações normativas dos órgãos nacionais responsáveis (DNIT e ABNT), bem como algumas especificações normativas internacionais (ASHTO e ASTM).

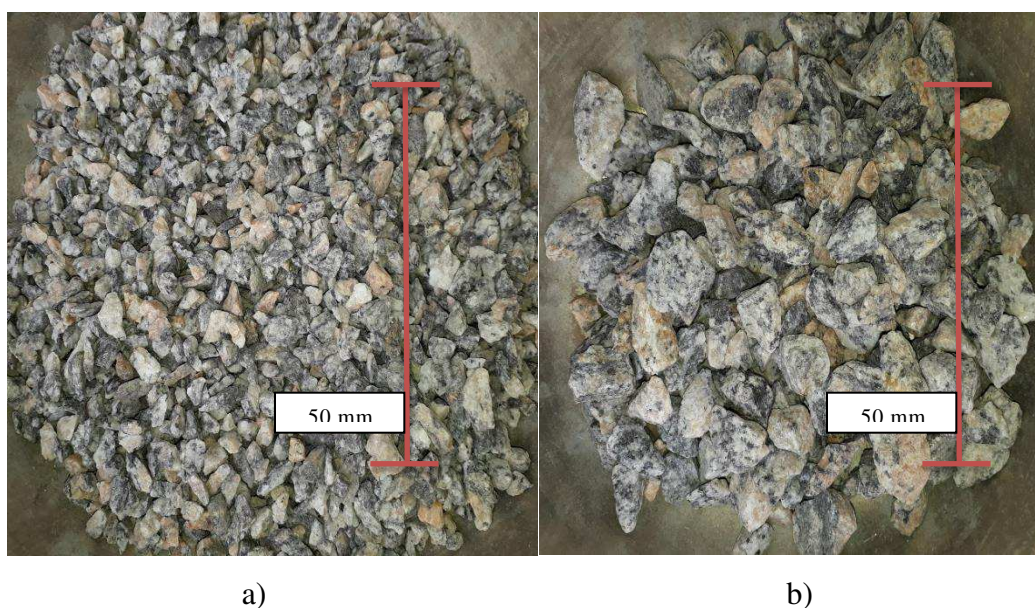
3.1 Materiais

Os materiais utilizados para realização dos ensaios serão descritos a seguir juntamente com a localização de onde foram adquiridos.

3.1.1 Agregados

Nesta pesquisa foi utilizado o agregado granítico em misturas asfálticas devido a ele ser o mais usado na região e, portanto ser um parâmetro comparativo para a laterita. A brita granítica foi obtida da jazida da empresa Rocha da cidade de Campina Grande-PB (Figura 1). O agregado laterítico (Figura 2) foi proveniente da jazida Mari localizada na cidade de Mari- PB. A areia que se utilizou nas misturas asfálticas foi adquirida no comércio local de Campina Grande- PB (Figura 3). O pó de pedra (Figura 4) foi proveniente da jazida da empresa Rocha.

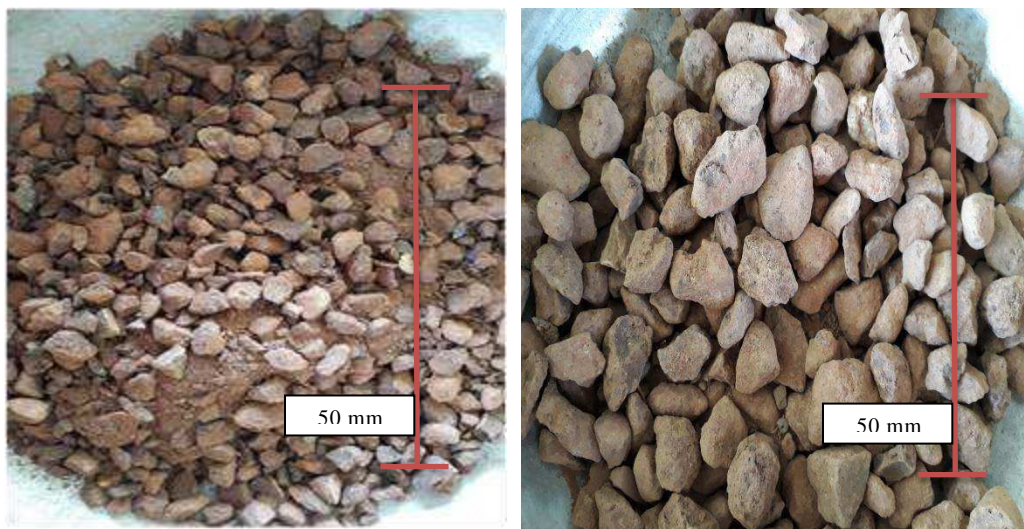
Figura 1: Agregado granítico a) Brita 9,5 mm b) Brita 19 mm.



a)

b)

Figura 2: Agregado laterítico a) Laterita 9,5 mm b) Laterita 19 mm.



a)

b)

Figura 3: Areia.

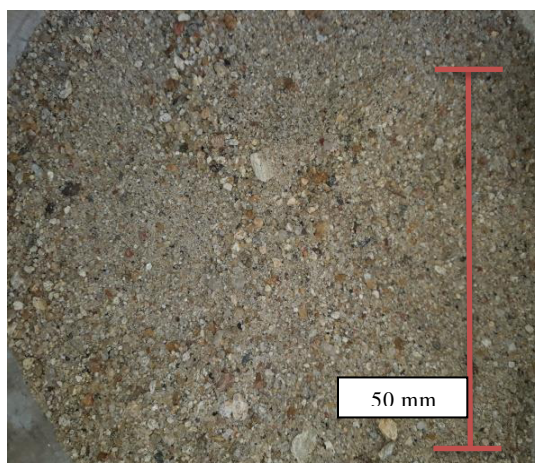
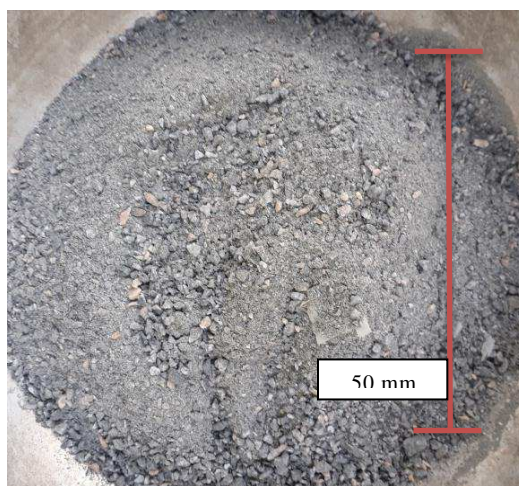


Figura 4: Pó de pedra.



3.1.2 *Fíler*

O fíler utilizado na pesquisa foi à cal hidrata obtida do comércio local de Campina Grande- PB.

3.1.3 *Ligante*

O ligante utilizado para a pesquisa foi o CAP 50/70 (Figura 5), oriundo da usina de beneficiamento da empresa Rocha localizada na cidade de Campina Grande-Pb.

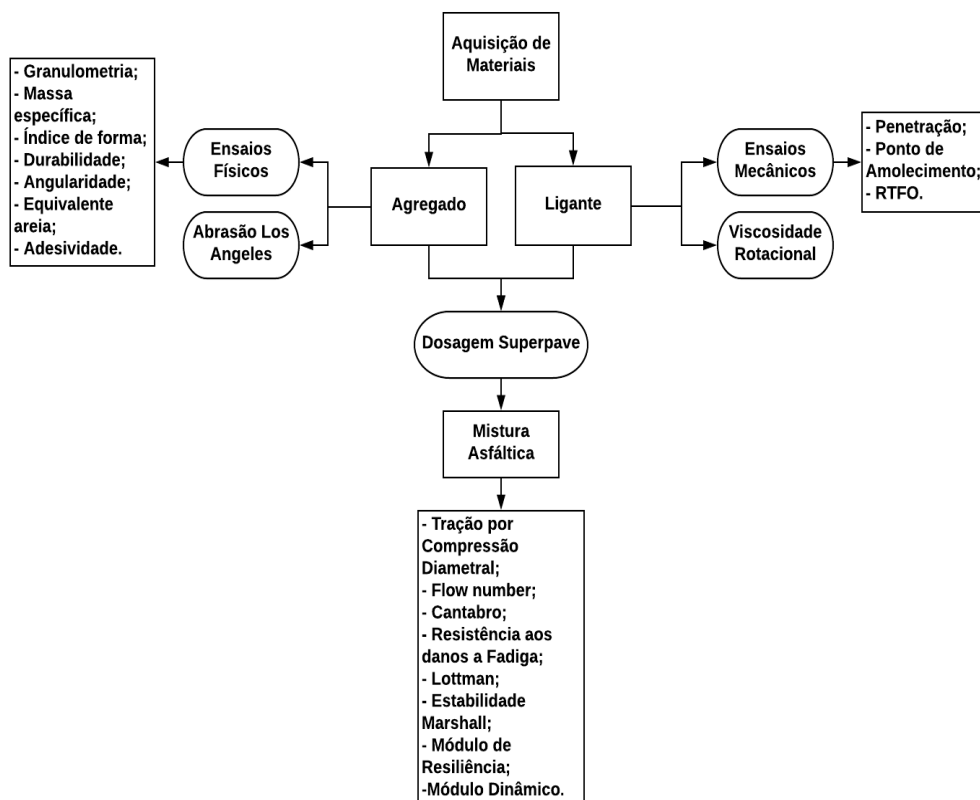
Figura 5: CAP 50/70.



3.2 Métodos

Para realização das análises foram utilizados os ensaios e metodologias apresentados nos itens subsequentes. O Fluxograma da Figura 6 apresenta as etapas dos trabalhos desenvolvidos durante a pesquisa.

Figura 6- Fluxograma das atividades de pesquisa.



3.3 Ensaios realizados com os agregados

Para caracterização física dos agregados utilizados na pesquisa foram realizados os ensaios apresentados nos subitens subsequentes conforme as normas e procedimentos adequados.

3.3.1 Granulometria

O ensaio de granulometria é regido pela norma ME 083/98 do DNIT. Para este ensaio foram peneirados todos os agregados isoladamente, por meio de uma série de peneiras, o qual determinou em percentagem o peso que cada faixa especificada de tamanho de partículas representa na massa total ensaiada. De acordo com o resultado deste ensaio, tornou-se possível traçar as respectivas curvas de distribuição granulométrica, importante para a classificação, como para a estimativa dos parâmetros volumétricos de misturas asfálticas.

3.3.2 *Massa específica e absorção do agregado graúdo e miúdo*

A norma que determina quais os procedimentos para realização do ensaio de massa específica de agregado graúdo e absorção é a ME 081/98 do DNIT. O ensaio teve o objetivo de determinar o valor da massa específica das partículas. Para a realização do ensaio a amostra foi imersa em água por 24 horas. Logo em seguida o agregado foi espalhado sobre um pano absorvente e secado um a um até que a película de água aparente foi eliminada. Depois se pesou os agregados e foi registrada a massa da amostra na condição saturada de superfície seca (Mh). Imediatamente após, a amostra foi imersa em água e feita à leitura do peso submerso (L). A amostra foi retirada da água e inserida na estufa em temperatura entre 105°C e 110°C. Logo após foi pesada e encontrou-se a massa seca da amostra (Ms) . Utilizando as equações I, II e III determinaram-se os parâmetros 1, 2 e 3, respectivamente.

$$(1) \quad D_{ap} = \frac{M_s}{M_h - L} \quad (eq. I)$$

Onde,

D_{ap} = densidade aparente do agregado na condição seca em estufa.

$$(2) \quad a = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100 \quad (eq. II)$$

Onde,

a = absorção.

Para o agregado miúdo, o ensaio de massa específica é descrito pela norma do DNIT ME-84/95. A amostra é imersa em água por 24h e logo após é seca com o auxílio do dessecador. Em seguida colocou-se o agregado miúdo (areia e pó de pedra) no picnômetro e anotaram-se todas as medidas para obter a massa específica do agregado miúdo de acordo com a equação da norma:

$$(3) \quad D_{25} = \frac{b - a}{(d - a) - (c - b)} \quad (eq. III)$$

Onde:

D_{25} = densidade real do agregado miúdo, a 25° C;

a = massa do picnômetro vazio e seco, em g;

b = massa do picnômetro mais amostra, em g;

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

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

3.3.3 Índice de forma

O ensaio de índice de forma foi realizado de acordo com a norma do DNIT-ME 086/94. O ensaio teve o objetivo de determinar os eixos multidirecionais das partículas que compõem o agregado, definindo-a pelo índice de forma. Para a realização do ensaio foram utilizados crivos de abertura circular e retangular. Inicialmente analisou-se em qual faixa da tabela que está na norma se encaixou o agregado utilizado. Depois dos agregados passarem pelos crivos foram pesados. O cálculo do índice de forma é realizado por meio da equação IV.

$$f = (P1 + 0,5 P2)/(100 n) \quad (eq.IV)$$

Onde:

f = índice de forma;

$P1$ = Soma das porcentagens retidas no crivo I, de todas as frações que compõem a graduação;

$P2$ = Somas das porcentagens retidas no crivo II, de todas as frações que compõem a graduação;

n = número de frações que compõem a graduação escolhida;

3.3.4 Abrasão Los Angeles

De acordo com a norma ME 035/98 do DNIT, o ensaio é definido como o desgaste sofrido pelo agregado, quando colocado na máquina de ensaio Los Angeles juntamente a uma carga abrasiva, submetida a um determinado número de rotações desta máquina à velocidade de 30 à 33 rpm. O desgaste é convencionalmente expresso pela porcentagem, em peso, do material passante, após o ensaio na peneira de malhas quadradas de 1,7mm ou peneira nº 12 da ABNT. De acordo com a norma, para os agregados serem utilizados em camadas de base e revestimento de pavimentos o valor máximo de Abrasão Los Angeles deve ser de 55%.

Esse ensaio teve finalidade de medir o desgaste superficial do agregado quando ele é submetido ao atrito entre as partículas. Essa característica de resistência à abrasão é importante para definir a utilização de agregado em misturas asfálticas.

3.3.5 *Durabilidade*

O ensaio foi realizado de acordo com a norma DNIT-ME 089/94. A metodologia tem o objetivo de determinar a resistência de desintegração dos agregados sujeitos à ação do tempo, pelo ataque de soluções saturadas de sulfato de sódio ou de magnésio. O resultado é encontrado observando-se o efeito da ação do sulfato e sua natureza, assim como a quantidade de partículas que são afetadas pela solução.

O ensaio simula um efeito de intemperismo sobre os agregados, sendo possível avaliar o quanto esse agregado é susceptível a ação natural do tempo.

3.3.6 *Equivalente areia*

O ensaio de equivalente de areia, descrito na norma DNIT-ME 054/97, determina a proporção relativa de materiais do tipo argila ou pó em amostras de agregados miúdos. Para que um agregado possa ser utilizado em concreto asfáltico, o equivalente de areia deve ser de pelo menos 55% de acordo com os parâmetros da norma.

O ensaio foi executado conforme a norma DNIT ME 054/97, sendo uma 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 agregado miúdo, numa proveta, em condições estabelecidas.

3.3.7 *Adesividade*

O ensaio de adesividade tem o objetivo de verificar a adesividade do agregado graúdo ao ligante betuminoso. Pelo método de ensaio do DNIT-ME 078/94 a mistura asfáltica não compactada foi imersa em água e as partículas cobertas pelo ligante asfáltico foram avaliadas visualmente.

Esse ensaio é de grande importância, pois o efeito da água de separar ou descolar a película de ligante asfáltico da superfície do agregado pode torná-lo inaceitável para uso em misturas asfálticas. Esse agregado é denominado de hidrófilo. Entretanto, agregados com alta adesividade em presença de água são denominados de hidrofóbicos e são aceitáveis para utilização em misturas asfálticas.

3.4 Caracterização do ligante

Para realização da caracterização do ligante utilizado na pesquisa, foram realizados os ensaios descritos nos subitens subsequentes conforme as normas pré-estabelecidas.

3.4.1 Penetração

A Norma do DNIT ME -155/2010 determina os parâmetros para o ensaio de penetração. O ensaio de penetração tem o objetivo de medir a profundidade, em décimos de milímetro, que uma agulha padrão penetra verticalmente na amostra de material sob condições prefixadas de carga, tempo e temperatura. O ensaio aconteceu nas condições de tempo de 5s, carga de 100g e a uma temperatura de 25°C.

3.4.2 Ponto de amolecimento

Este ensaio teve a finalidade de determinar o Ponto de Amolecimento dos materiais asfálticos na faixa de 30°C a 157°C, com o uso da aparelhagem Anel e Bola. A execução do ensaio ocorreu de acordo com a NBR 6560/2000, e foram seguidas todas as etapas, desde a preparação da amostra, à razão de temperatura de controle de aquecimento da água para a realização do ensaio.

O ensaio consistiu em colocar uma bola de aço de dimensões e peso especificados no centro de uma amostra de asfalto que está confinada dentro de um anel metálico padronizado. Todo o conjunto foi colocado dentro de um banho de água num béquer. O banho é aquecido a uma taxa controlada de 5°C/minuto. Quando o asfalto amoleceu o suficiente para não mais suportar o peso da bola, a bola e o asfalto deslocaram-se em direção ao fundo do béquer. A temperatura foi marcada no instante em que a mistura amolecida tocou a placa do fundo do conjunto padrão de ensaio.

3.4.3 Viscosidade Rotacional

De acordo com Bernucci *et al.* (2008) o viscosímetro Rotacional permite medir as propriedades de consistência relacionadas ao bombeamento e à estocagem e obter gráfico de temperatura-viscosidade para projeto de mistura asfáltica, por meio de medida do comportamento do fluido a diferentes taxas de cisalhamento e a diferentes tensões de cisalhamento, obtidas por rotação de cilindros coaxiais que ficam mergulhados na amostra em teste. As normas que estabelecem o procedimento de

ensaio são a ABNT NBR 15184 e ASTM D 4402/02. A viscosidade rotacional foi uma medida da viscosidade dinâmica expressa em centipoise (cP). O ensaio é considerado importante por fornecer parâmetros de consistência e temperatura do ligante, tendo em vista que é necessário o conhecimento desses parâmetros para aplicação correta em campo.

3.4.4 RTFO

O RTFO é um procedimento aplicado para a avaliação do envelhecimento em curto prazo do ligante asfáltico, utilizando-se a estufa de filme fino rotativa, (*Rolling Thin Film Oven*). Este envelhecimento é correlacionado com o envelhecimento do ligante que ocorre na usina e transporte até sua aplicação. Dois mecanismos são mais importantes para avaliação do envelhecimento de um ligante, que são: a perda dos componentes voláteis e as reações químicas que acontecem do asfalto com o oxigênio da atmosfera. As normas que regulamentam os procedimentos e especificações deste ensaio são a ABNT NBR 15235/2009, norma brasileira e a ASTM D2872-12 / 2013.

O CAP puro foi envelhecido em curto prazo por meio de uma estufa de filme fino rotativo (RTFO). Após o aquecimento do CAP em estufa, foram colocadas as amostras nos frascos. Inicialmente, os frascos contendo a amostra foram pesados e posteriormente inseridos na estufa. Após a estabilização da temperatura em 163°C, uma fina película de asfalto foi continuamente girada dentro do recipiente por 85 minutos, com uma injeção de ar a cada 3 a 4 segundos. Após a conclusão do ensaio, os frascos contendo o CAP foram novamente pesados e calculados a perda de massa. Esse ensaio simula o envelhecimento em curto prazo do CAP, que é uma característica do ligante a ser examinada para posterior utilização desse material na mistura asfáltica.

3.5 Dosagem das Misturas

Para realização dos ensaios mecânicos com as misturas asfálticas foi efetuada primeiramente a dosagem das misturas asfálticas para obter o teor de ligante ótimo, de acordo com a composição granulométrica. O método de dosagem utilizada foi o do *SUPERPAVE* que é uma metodologia que estima um teor provável de ligante por meio do volume de vazios e da granulometria do agregado disponível, onde a compactação dos corpos-de-prova realiza-se por amassamento.

O princípio fundamental da dosagem *SUPERPAVE* é que a quantidade de ligante utilizada deve ser tal que a mistura alcance 4% de vazios no número de giros (100) do projeto. De acordo com esse princípio o teor de ligante foi estimado e os corpos-de-prova foram moldados considerando o teor de 4,23% para o agregado granítico e 7,17% para o agregado laterítico assim como: teor estimado $\pm 0,5\%$ e + 1% para ambas as misturas. Depois da compactação dos corpos-de-prova foram verificados os parâmetros volumétricos com a realização do ensaio Rice Test e a partir deles encontrou-se o teor final de projeto que foi aquele na qual a mistura asfáltica atendeu ao critério de volume de vazios igual a quatro pontos percentuais (4%). Portanto, o teor ótimo de ligante encontrado para as misturas com os agregados está exposto na Tabela 1.

Tabela 1: Valores encontrados de teor ótimo de ligante.

Teor ótimo de Ligante	
Granítico	Laterítico
4,73%	7,67%

Observa-se que o teor de ligante ótimo da laterita foi 38,33% superior ao da brita granítica. Esse fato pode-se explicar pela alta porosidade e a maior quantidade de finos presentes na laterita.

3.6 Estudo das Propriedades Mecânicas das Misturas Asfálticas

Para o estudo das propriedades mecânicas das misturas foram utilizados os ensaios apresentados nos itens subsequentes seguindo as recomendações normativas.

3.6.1 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de Resistência à Tração Indireta por Compressão Diametral foi realizado segundo a Norma ME 136/2010 do DNIT. Esse ensaio determina a resistência à tração indireta de corpos-de-prova cilíndricos de mistura asfáltica, por meio do ensaio de compressão diametral com carregamento estático crescente até a ruptura.

Os corpos-de-prova foram preparados com o teor ótimo de asfalto e com o índice de vazios correspondentes aos que foram obtidos pela dosagem. A altura e o diâmetro deles foram medidos em quatro posições equidistantes e calculados a média aritmética. Os corpos-de-prova foram colocados na prensa, onde se aplicou o carregamento vertical correspondente.

3.6.2 *Flow Number*

O ensaio chamado de *Flow Number* é um procedimento utilizado com o objetivo de avaliar o comportamento de uma mistura asfáltica com relação a sua resistência a deformações permanentes. Pois já se foi estudado que ensaios com aplicação de cargas estáticas não mostram bem o mecanismo de deformação permanente encontrado em campo, sendo, por isso, mais indicado a utilização de ensaios com aplicações de cargas repetidas (VALKERING *et al.*, 1990).

A definição de *Flow Number* é o número de repetições de carga em que a deformação de cisalhamento, sob volume constante, se inicia. Podendo afirmar que o FN é o ponto onde a deformação permanente acumulada na mistura passa a aumentar rapidamente, o que indica que a amostra entrou em colapso (BUDNY, 2012).

O FN está ligado ao ciclo onde a taxa de deformação plástica é mínima. A partir deste ciclo o corpo-de-prova entra na zona terciária e rompe (WITCZAK *et al.*, 2002).

O ensaio fundamenta-se em aplicar um carregamento de 204 KPa repetido, com o tempo de aplicação da carga de 0,1 s com período de repouso de 0,9 s, em corpos-de-prova com volume de vazios de 7% e diâmetro e altura de 100 mm e 150 mm respectivamente.

3.6.3 *Cântabro*

O ensaio realizado para medir a desagregação do rolamento de um pavimento devido ao efeito do atrito é o ensaio Cântabro realizado de acordo com a norma DNIT-ME 383/99 sendo baseado na norma espanhola NTL de 1986. O ensaio resumiu-se em analisar corpos-de-prova dosados pelo método do *Superpave* de misturas asfálticas porosas, sujeitos ao desgaste por abrasão Los Angeles. Foram aplicadas 300 revoluções a uma velocidade angular e 30rpm, em temperatura controlada de 25°C. O desgaste Cântabro é calculado por meio da equação V estabelecida pela norma.

$$A\% = \frac{P - P'}{P} \times 100 \quad (eq.V)$$

3.6.4 *Resistência aos danos à fadiga*

O ensaio de resistência aos danos à fadiga foi realizado para avaliar o quão as misturas asfálticas são resistentes a deformações permanentes. Os procedimentos do ensaio iniciaram-se com a fabricação dos corpos-de-prova em amostras cilíndricas, com

alturas de $63,5 \pm 1,3$ mm e diâmetros de 100 ± 2 mm. Logo após, com o auxílio do paquímetro mediu-se as alturas (H) e diâmetros (D) dos corpos-de-prova em 3 posições diferentes e em seguida calculou-se a média aritmética das leituras efetuadas anotando-as. Depois os corpos-de-prova foram posicionado na base do dispositivo centralizador de amostra e regulou-se o pistão de aplicação de carga. A carga foi aplicada com frequência de aplicação total de 1Hz e com durações de 0,1 segundo e repouso de 0,9 segundos. As aplicações de ciclos foram registradas no contador analógico conforme ocorreu variação da pressão durante a aplicação da carga. Registrou-se o número de ciclos final necessário à ruptura do corpo-de-prova. A quantidade de ciclos de carga em que o corpo-de-prova resiste é o que caracteriza a sua resistência aos danos à fadiga.

3.6.5 *Lottman*

O ensaio Lottman também é chamado de ensaio de Resistência ao Dano por Umidade Induzida em misturas asfálticas. As amostras compactadas de misturas asfálticas com teores de vazios preestabelecidos foram parcialmente saturadas com água e submetidas a baixas temperaturas que refletissem as que ocorrem na região mais fria do Nordeste durante um período de tempo estabelecido em norma, simulando a presença de água na mistura e tensões internas induzidas por cargas do tráfego. O ensaio de Lottman foi realizado segundo a Norma ME 136/2017 do DNIT e a Norma da AASHTO T 283-02.

Para a realização do ensaio, corpos de prova cilíndricos foram compactados pelo método do *SUPERPAVE*, com 1200g de mistura asfálticas e posteriormente, analisados as relações entre resistência a tração com e sem condicionamento térmico. Foram moldados seis corpos de prova padronizados pelo método do Superpave e dividiu-se em dois grupos de três corpos de prova. O primeiro grupo foi colocado em um saco plástico para imersão em água a 25°C por aproximadamente 2 horas. O segundo grupo foi colocado em um recipiente com água e aplicou-se o vácuo até obter grau de saturação entre 70 e 80% de água.

Após imersão em água, os CPs foram colocados em sacos plásticos com 10 ml de água adicional, vedando-os em seguida. As amostras seguiram para o congelamento por um período de 16 horas. Após terminado essa etapa mergulhou-se esse grupo em banho de água a 60°C por um período de 24 horas, retirando-se os corpos de prova dos sacos plásticos e do filme após imersão. Colocou-se o conjunto em outro banho a 25°C

por 2 horas (BERNUCCI *et al.*, 2008). Foi aplicado ao primeiro grupo o ensaio de resistência à tração não-condicionado (RT) e também no segundo grupo após o ciclo de condicionamento (RTu). Calculou-se então, a resistência à tração retida por unidade induzida (RRT) que é a razão entre RTu e RT. Segundo Bernucci et al., (2008, p. 331), espera-se um valor de RRT maior que 70% para que a amostra seja aprovada.

3.6.6 Estabilidade Marshall

O ensaio de Estabilidade Marshall foi realizado de acordo com a norma DNIT-ME 043/95. O ensaio teve a finalidade de determinar a estabilidade e a fluência de misturas betuminosas usinadas a quente, utilizando o aparelho Marshall. O molde foi posicionado na prensa, que foi operada por meio de um êmbolo com velocidade de 5 cm/min até o rompimento do corpo de prova. A carga necessária para o rompimento do corpo-de-prova foi anotada e posteriormente corrigida de acordo com a espessura do mesmo.

3.6.7 Módulo de Resiliência

O ensaio de Módulo de Resiliência realizou-se de acordo com a Norma ME - 133/94 do DNIT. De acordo com a norma brasileira, o ensaio teve como objetivo determinar o módulo de resiliência de misturas betuminosas, utilizando como meio para realização do ensaio o equipamento de compressão diametral por carga repetitiva. A realização do ensaio é baseada na aplicação de uma carga compressiva em formato de onda pulsante (haversine) repetidamente no plano diametral vertical de um corpo de prova cilíndrico regular, que gera uma tensão de tração transversalmente ao plano de aplicação, sendo então medido o deslocamento diametral recuperável na direção horizontal correspondente à tensão gerada. Foi realizada a aplicação de uma carga igual a 10% da Resistência à Tração obtida para cada Mistura Asfáltica com o seu respectivo teor de CAP (0,13 MPa para a brita granítica e 0,093 MPa para a laterita), essa aplicação ocorreu a uma frequência de 60 ciclos por minuto (1Hz), com o tempo de aplicação de 0,10 segundo e, portanto, com 0,90 segundo de repouso ou descarregamento. O módulo de resiliência (Figura 7) foi determinado pela equação VI.

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

Onde:

MR= Módulo de resiliência em MPa;

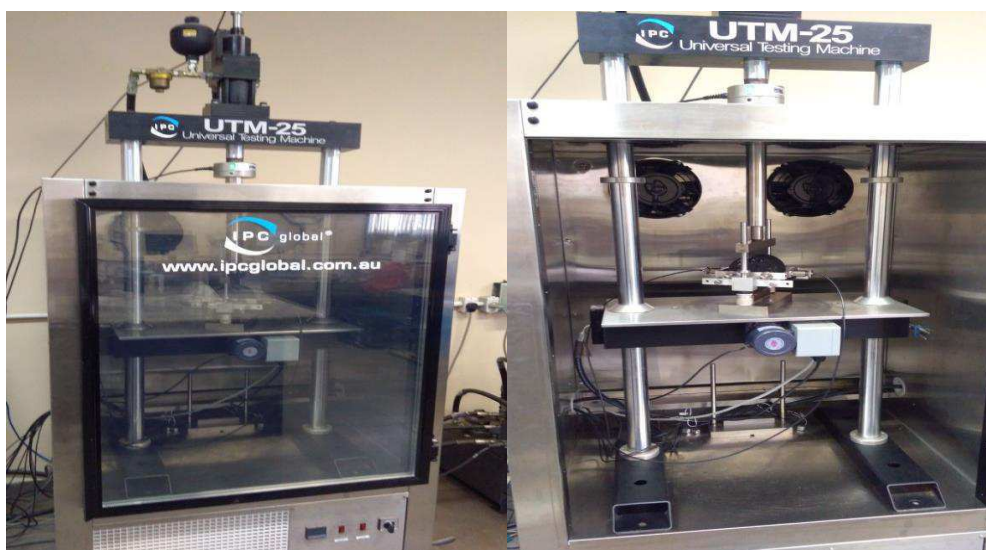
F= Carga vertical aplicada em N;

Δ = Deformação elástica registrada pelo osciloscópio, em cm;

H= altura do corpo-de-prova, em cm;

μ = Coeficiente de Poisson;

Figura 7: UTM-25.



3.6.8 Módulo Dinâmico

O ensaio de Módulo dinâmico foi desenvolvido para medir tanto viscoelasticidade quanto propriedades elásticas de materiais de pavimentos, este foi realizado de acordo com a norma americana ASTM D 3497/2009.

Os procedimentos dos ensaios iniciaram-se com a moldagem dos corpos-de-prova com uma relação altura/diâmetro de 2:1 e diâmetro mínimo de 10 cm. O dispositivo de carregamento transmite ondas de forma senoidal em frequências de 0,1 a 20 Hz e uma tração máxima de 0,7 MPa. Foi utilizado também um dispositivo para controle de temperatura uma vez que as amostras foram testadas a temperaturas de 4°C, 21°C e 37°C. O corpo-de-prova foi colocado na AMPT (Figura 8) e aplicou-se carregamento axial à temperatura controlada. A norma ASTM D 3497 define a carga que deve ser aplicada dentro de faixas de temperatura.

Figura 8: AMPT.



4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Serão apresentados os resultados e a análise dos dados obtidos para os agregados, o CAP 50/70 e as misturas asfálticas respectivamente.

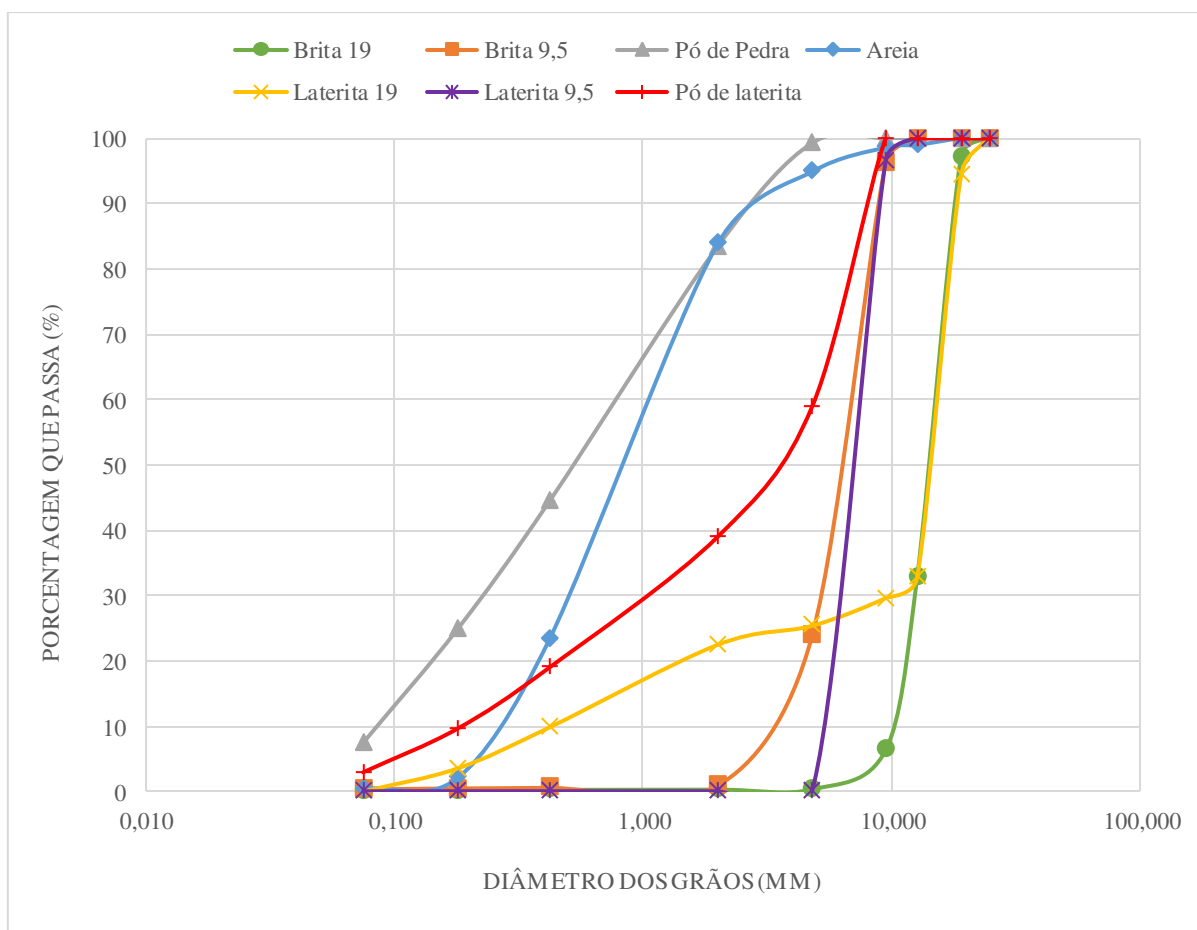
4.1 Agregados

Nos itens subsequentes serão apresentados e discutidos os resultados obtidos dos ensaios realizados com os agregados.

4.1.1 Granulometria

A Figuras 9 apresentam as curvas de distribuição granulométrica das partículas dos agregados granítico, laterítico, pó de pedra e areia. A partir destes resultados foram estabelecidas as proporções dos agregados graúdos e miúdos, de acordo com as especificações das faixas granulométricas “C” preconizadas pelo DNIT, para a obtenção do teor ótimo de asfalto pelo procedimento *SUPERPAVE*. Verifica-se que os valores encontrados das composições granulométricas, obtidos a partir das proporções estabelecidas em função de cálculos numéricos estão dentro dos limites pré-estabelecidos pela Faixa C do DNIT. Das curvas granulométricas é possível perceber que para a amostra da brita granítica de 19 mm, a porcentagem mais alta (64,53%) de material passou pela peneira 19,0 mm e ficou retida na peneira 12,5mm. Para a laterita 61,64% do material passou pela peneira 19,0 mm e ficou retida na peneira 12,5 mm. A brita granítica apresenta a maioria de suas partículas com tamanhos em uma faixa bastante estreita. A laterita demonstra uma curva granulométrica contendo maior número de finos.

Figura 9: Curva granulométrica dos agregados



4.1.2 Massa específica e absorção

A Tabela 2 apresenta os resultados de Massa específica e absorção do agregado graúdo e miúdo respectivamente.

Tabela 2: Resultado do ensaio de massa específica e absorção dos agregados.

Agregado	Massa específica (g/cm ³)	Absorção (%)
Brita Granítica #19.0	2,846	0,44
Brita Granítica #9.5	2,787	0,85
Laterita #19.0	3,012	5,26
Lateria #9.5	3,095	5,67
Areia	2,47	0,3
Pó de Pedra	2,52	0,14

Os resultados obtidos permitiram obter a relação da massa de água absorvida pelo agregado graúdo e miúdo após período de imersão. O agregado granítico apresentou valores aceitáveis de absorção de acordo com a norma (2%), enquanto a laterita evidencia um valor acima do aceitável, portanto insatisfatório. Segundo

Bernucci *et al.* (2008) é uma característica natural de o agregado laterítico possuir uma alta porosidade, e, conseqüentemente uma alta absorção de ligante.

4.1.3 Índice de forma

A Tabela 3 resume os resultados obtidos do ensaio de índice de forma.

Tabela 3: Resultado do ensaio de índice de forma

Agregado	Índice de Forma	Referência (DNER – ME 086/94)
Brita Granítica # 19.0	0,91	$0 \leq f \leq 1$ sendo : $f=1 \rightarrow$ ótima esfericidade $f=0 \rightarrow$ lamelar
Brita Granítica # 9.5	0,65	
Laterita # 19.0	0,93	
Laterita # 9.5	0,78	

O índice de forma pode variar de 0,0 a 1,0, sendo o agregado considerado de ótima cubicidade quando $f = 1,0$ e lamelar quando $f = 0,0$. É adotado o limite mínimo de $f = 0,5$ para aceitação de agregados quanto à forma. Portanto, tanto o agregado granítico quanto laterítico possuem índices de forma aceitáveis para utilização em misturas asfálticas.

4.1.4 Abrasão Los Angeles

O resultado do ensaio de Abrasão “Los Angeles” encontra-se exposto na Tabela 4.

Tabela 4: Resultados do ensaio de abrasão “Los Angeles”.

Agregado	Faixa	Abrasão (%)
Brita Granítica #19.0	B	20,6
Brita Granítica #9.5	C	25,7
Laterita #19.0	B	39,1
Laterita #9.5	C	31,2

Verifica-se nos resultados do ensaio de Abrasão “Los Angeles”, tanto para o agregado granítico quanto para o laterítico, ficaram dentro do limite estabelecido pela Norma brasileira (ME 035/98 do DNIT) para os serviços de pavimentação cujo valor da abrasão “Los Angeles” (LA) deve ser no máximo 50%. Portanto, ambos os agregados se mostram satisfatórios para a utilização em misturas asfálticas.

4.1.5 Durabilidade

O ensaio de durabilidade foi executado de acordo com a norma DNIT-ME 089/94. O resultado encontra-se na Tabela 5.

Tabela 5: Resultado do ensaio de durabilidade.

Agregado	Durabilidade (%)
Brita Granítica # 19.0	1,8
Laterita # 19.0	58

O agregado granítico apresentou uma pequena porcentagem de sua massa afetada pela solução, já o agregado laterítico se mostra muito sensível ao efeito da solução, sendo insatisfatório o seu desempenho.

4.1.6 Equivalente areia

Os resultados do ensaio de equivalente areia dos agregados miúdos estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Resultado do ensaio de Equivalente areia.

Agregado	Equivalente areia (%)
Areia	86,7%
Pó de Pedra	61,0%

Para que um agregado possa ser utilizado em concreto asfáltico, o equivalente de areia deve ser de pelo menos 55%. Portanto, ambos os agregados possuem equivalente areia de acordo com o que a norma preconiza.

4.1.7 Adesividade

O ensaio de Adesividade aos ligantes betuminosos é representado nas Figuras 10 e 11. Tanto para o agregado granítico quanto para o laterítico o ensaio mostrou resultados insatisfatórios, conforme o padrão estabelecido pela norma DNIT-ME 078/94. Pois, foi visível o efeito da água de separar/descolar a película de ligante asfáltico da superfície do agregado.

Figura 10: Imersão da mistura asfáltica não compactada em água.

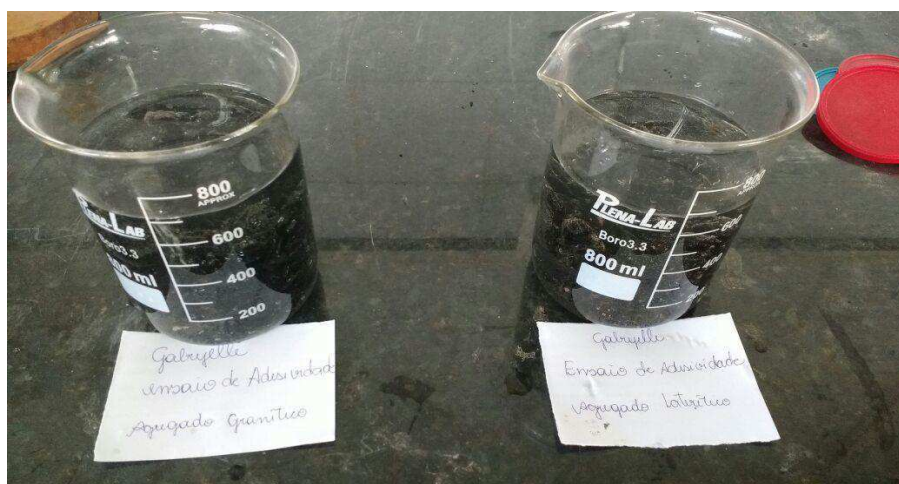


Figura 11: Agregados (granítico e laterítico) após a retirada da água.



4.2 Ligante

Os resultados dos ensaios de caracterização do CAP 50/70 utilizado nessa pesquisa (CAP 50/70) estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Resumo dos resultados com o CAP 50/70.

ANTES DO RTFO			
CARACTERÍSTICAS	UNIDADE	LIMITES	CAP
		CAP 50/70	
PENETRAÇÃO (100g,5s,25°C)	dmm	50-70	53
PONTO DE AMOLECIMENTO, mín	°C	46	47,25
VISCOSIDADE ROTACIONAL	cP		
a 135° C, SP 21 mín. 20 rpm		274	348,75
a 150° C, SP 21 mín.		112	175
a 177° C, SP 21 mín		57-285	64,75

APÓS O RTFO			
PENETRAÇÃO RETIDA, mín	dmm	55%	74,3%
AUMENTO DO PONTO DE AMOLECIMENTO,máx	°C	8	4,5
VISCOSIDADE ROTACIONAL	cP		
a 135° C, SP 21 mín. 20 rpm		-	467,5
a 150° C, SP 21 mín.		-	227
a 177° C, SP 21 mín		-	79,75
PERDA DE MASSA	%	0,5	0,12

De acordo com os dados apresentados na Tabela 7, o CAP 50-70 utilizado neste trabalho encontra-se dentro dos limites especificados pela norma (DNIT 095/2006). Observou-se que o ligante utilizado atendeu a todos os requisitos, antes e após RTFO, em relação à penetração, ao ponto de amolecimento, a viscosidade rotacional e a perda de massa.

4.3 Dosagem

A partir dos teores ótimos de ligantes para as misturas asfálticas serem encontrados foi possível realizar as dosagens das misturas asfálticas. As curvas fuller intermediárias dos agregados graníticos e lateríticos estão apresentadas nas Figuras 12 e 13, assim como suas respectivas Tabelas (8 e 10) de volumetria e as Tabelas (9 e 11) com o traço da mistura de projeto.

Figura 12: Curva Fuller intermediária do Agregado granítico.

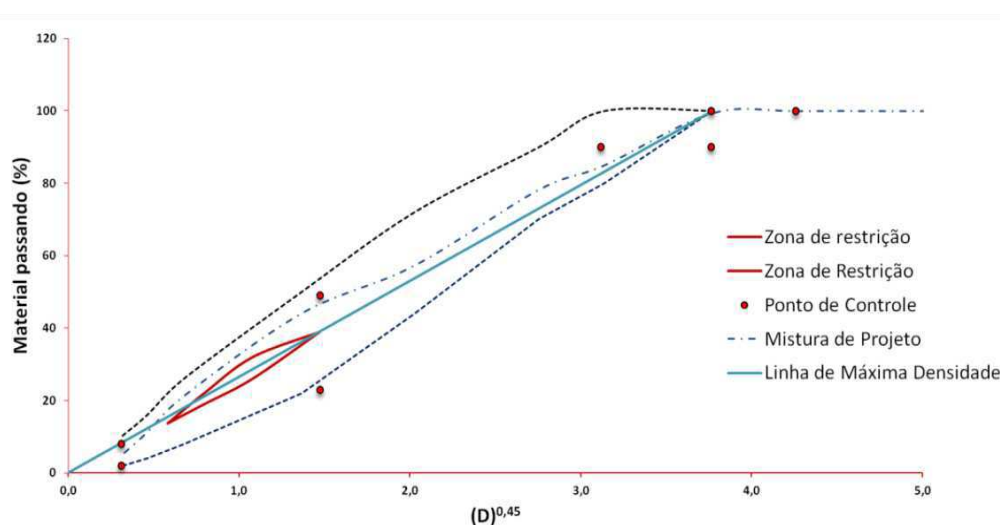


Tabela 8: Volumetria da dosagem com o agregado granítico.

VOLUME DE VAZIOS (%)	VAZIOS NO AGREGADO MINERAL (%)	RELAÇÃO BETUME VAZIOS	PÓ/ASFALTO	% Gmm(MASSA ESPECÍFICA MÁXIMA MEDIDA)	DENSIDADE MÁXIMA TEÓRICA
4,25	11,7	65,64	0,87	95,75	2,515

Tabela 9: Traço da mistura de projeto.

BRITA G. #19.0	BRITA G. #9.5	PÓ DE PEDRA	AREIA	CAL	CAP
21,0 %	24,77 %	33,3 %	14,3 %	1,9 %	4,73 %

Figura 13: Curva Fuller intermediária do Agregado laterítico.

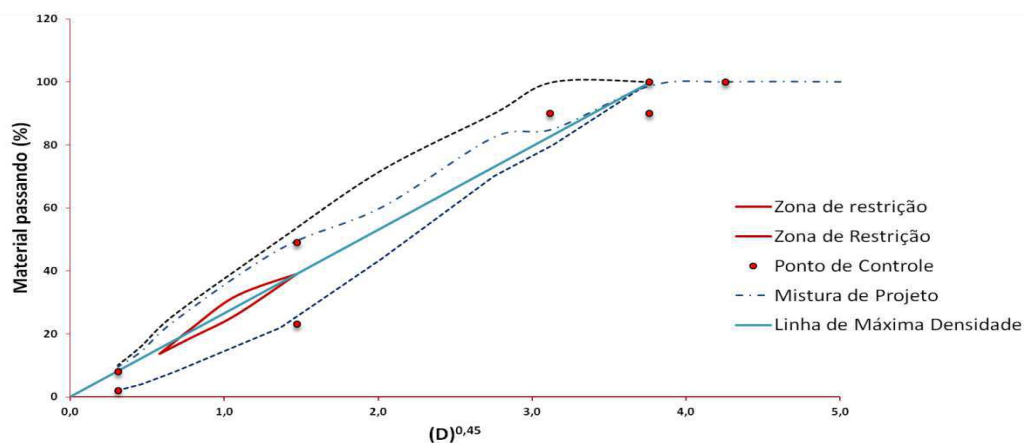


Tabela 10: Volumetria da dosagem Agregado Laterítico.

VOLUME DE VAZIOS (%)	VAZIOS NO AGREGADO MINERAL (%)	RELAÇÃO BETUME VAZIOS	PÓ/ASFALTO	% Gmm (MASSA ESPECÍFICA MÁXIMA MEDIDA)	DENSIDADE MÁXIMA TEÓRICA
3,89	12,58	68,26	0,55	96,11	2,443

Tabela 11: Traço da mistura de projeto.

LAT. #19.0	LAT. #9.5	PÓ DE LATERITA	AREIA	CAL	CAP
20,31 %	20,87 %	29,91 %	13,85 %	7,38 %	7,67 %

Após encontrados os traços das misturas foi possível perceber que elas apresentam características notoriamente diferentes. Para as misturas com laterita a quantidade de CAP cerca de 38% superior e uma quantidade de cal quase 4 vezes maior. O CAP se explica pela alta porosidade do agregado e o maior número de finos da laterita. A quantidade de cal superior foi necessária pra encaixar a mistura com laterita nas faixas C proposta pelo DNIT.

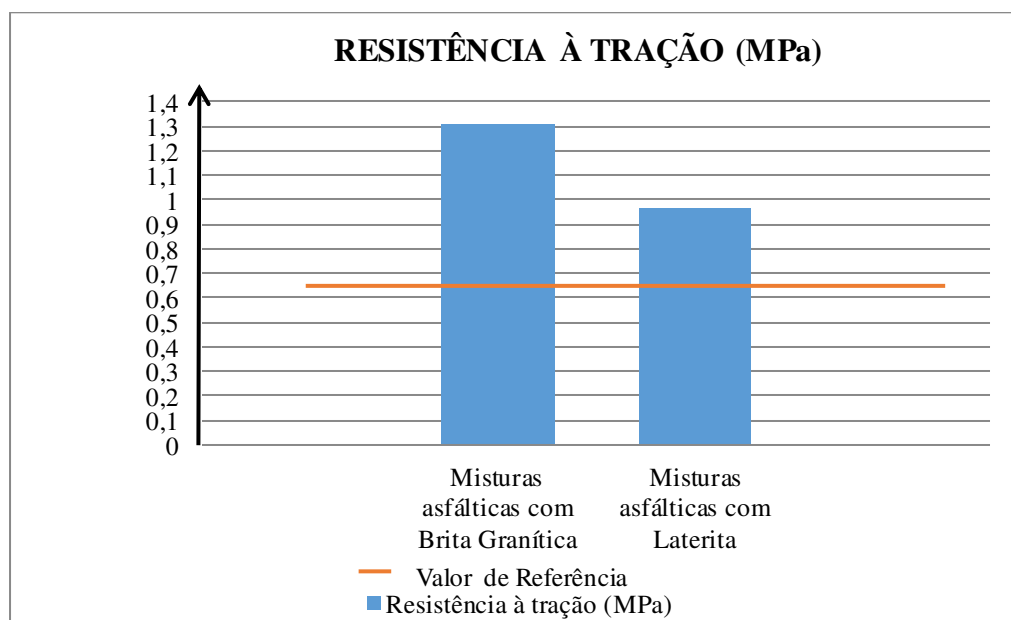
4.4 Misturas Asfálticas

Os resultados dos ensaios com misturas asfálticas estão apresentados a seguir.

4.4.1 Resistência à tração por compressão diametral

O resultado do ensaio de resistência à tração por compressão diametral está disposto na Figura 14.

Figura 14: Resultado do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.



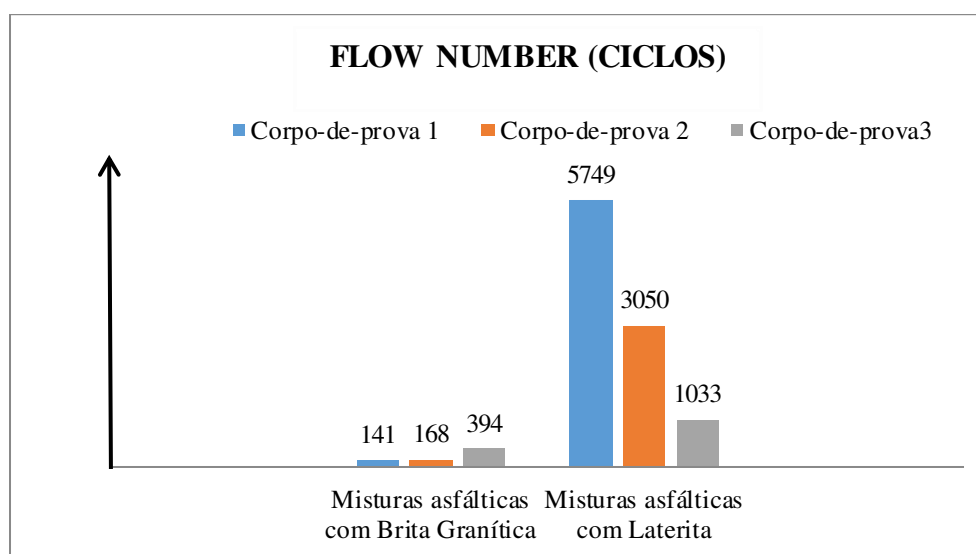
O resultado do ensaio de resistência a tração para ambas as misturas atendem ao mínimo exigido pela norma DNIT 031/2004-ES para camada de rolamento que é de

0,65 MPa. Observa-se que as mistura com agregado granítico possuem 26,6% maior resistência à tração do que as com agregado laterítico. Este fato era previsível uma vez que a laterita apresentou uma menor resistência à abrasão (47%) do que a brita.

4.4.2 Flow Number

O resultado do ensaio de Flow number encontra-se na Figura 15. Conforme mostrado na Tabela 13, o Advanced Asphalt Technologies (2011) e Bonaquist (2012) mostram valores recomendados de Flow number em quatro regiões de tráfego distinto (leve, médio, pesado e extremamente pesado) e seus parâmetros limites.

Figura 15: Resultado do Flow number.



Conforme mostrado na Tabela 12, o Advanced Asphalt Technologies (2011) e Bonaquist (2012) mostram valores recomendados de Flow number em quatro regiões de tráfego distinto (leve, médio, pesado e extremamente pesado). De acordo com os valores de FN obtidos, segundo essa tabela, todas as misturas avaliadas nessa pesquisa poderiam ser submetidas ao tráfego de intensidade média. Entretanto, o resultado da laterita demonstra que houve erro no ensaio devido às misturas com laterita apresentarem valores de flow number bem elevados. Esse erro foi ocasionado pelo volume de vazios da mistura asfáltica ser inferior a 7% (volume de vazios que a mistura deve apresentar para realização do ensaio de acordo com a norma). Portanto, pode-se concluir que apenas as misturas com brita granítica apresentam valores satisfatórios de flow number, podendo ser submetidas a tráfego de intensidade média.

Tabela 12: Valores mínimos de Flow number para diferentes níveis de tráfego.

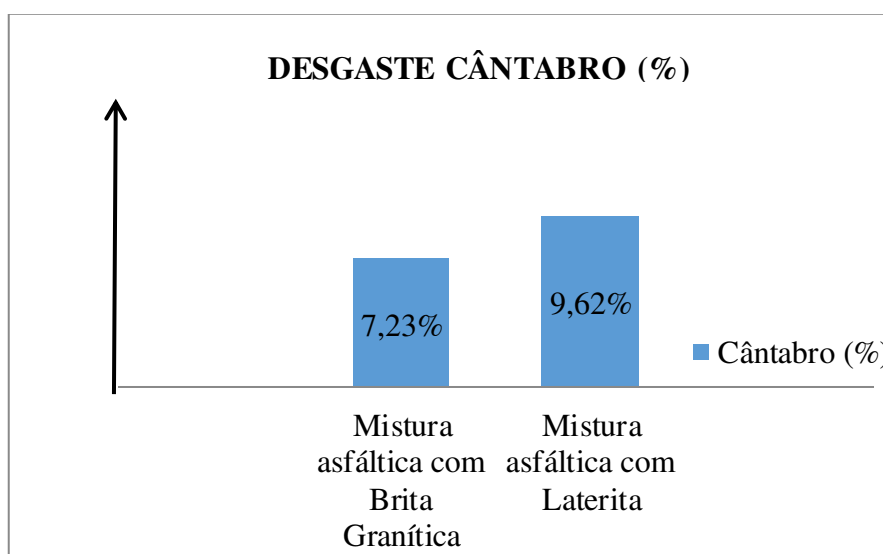
Pesquisas	Tráfego			
	Leve	Médio	Pesado	Extremamente Pesado
	< 3×10^5	< 3×10^6 ; 1×10^7	1×10^7 ; 3×10^7	> 3×10^7
Advanced Asphalt Technologies (2011)	-	53	190	740
Bonaquist (2012)	15	50	135	415

Fonte: COSTA, 2017.

4.4.3 Cântabro

O ensaio Cântabro permitiu obter resultados (Figura 16) sobre o arrancamento progressivo de agregados da capa de rolamento (desgaste) por efeito do atrito pneu-pavimento.

Figura 16: Resultado do ensaio Cântabro

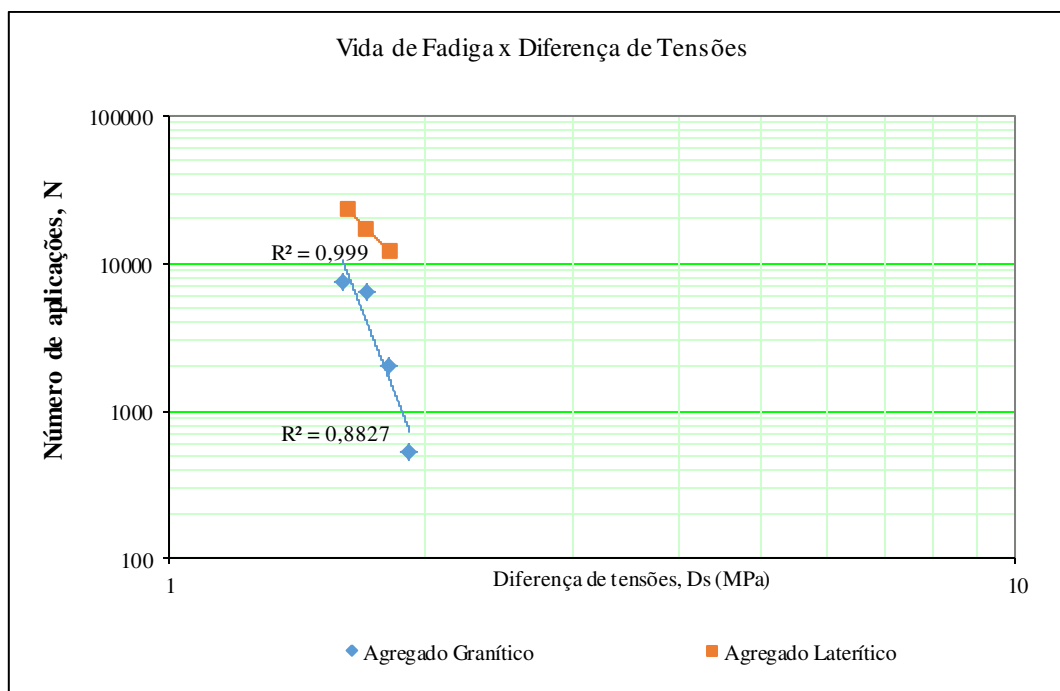


O desgaste máximo admitido é de 25% para misturas asfálticas porosas (DNIT, 1999). Portanto, as misturas compostas por agregado granítico e laterítico apresentam valores dentro do que é exigido pela norma para o desgaste cântabro. Todavia, confirma-se a análise realizada dos resultados do ensaio de abrasão Los Angeles e de durabilidade. A mistura com laterita submetida à degradação mecânica e química foi a que apresentou menor resistência, apontando que em comparação com a mistura utilizando a brita, apresenta menor resistência ao desgaste.

4.4.4 Resistência aos danos a Fadiga

A Figura 17 a seguir demonstram os resultados do ensaio de fadiga em forma de gráfico.

Figura 17: Gráfico do ensaio de fadiga x diferença de tensões para misturas asfálticas.



A partir do uso do software Excel foi possível obter as equações das curvas dos gráficos de vida de fadiga para ambas as misturas ensaiadas, foi possível obter também o valor do R^2 de cada linha de tendência.

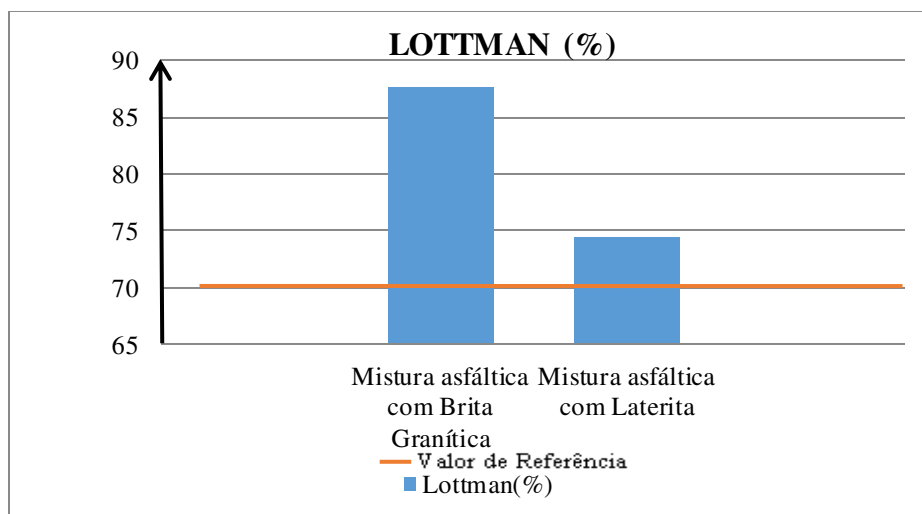
Observando os gráficos apresentados é possível inferir que as misturas utilizando agregado laterítico apresentam boa representatividade tendo em vista que o valor de R^2 foi bem próximo de 1.

Comparando os gráficos de vida de fadiga para ambas as misturas é possível verificar que a mistura com agregado laterítico ensaiada apresenta melhor comportamento de resistência ao dano por fadiga do que a mistura utilizando agregado granítico.

4.4.5 Lottman

A Figura 18 a seguir resume os resultados do ensaio Lottman.

Figura 18: Resultado do ensaio Lottman.

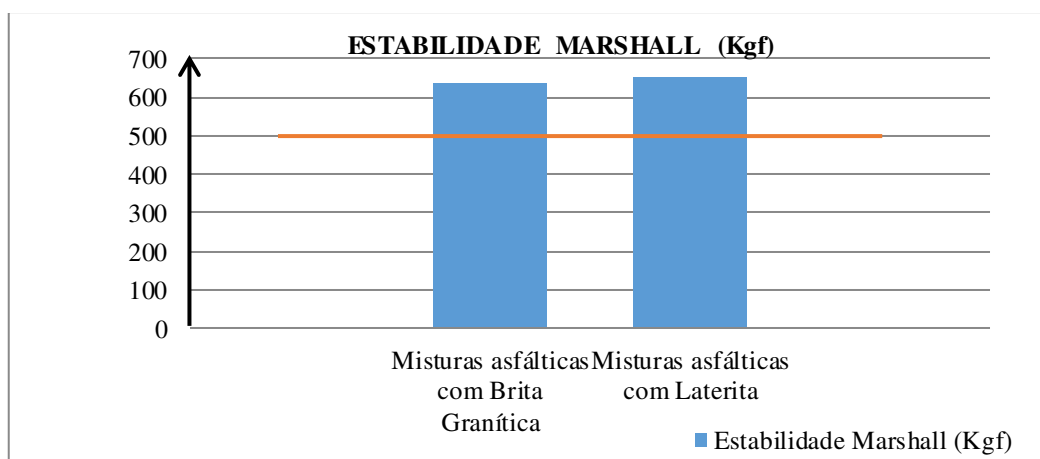


No caso de misturas contínuas, o valor mínimo de resistência à tração retida por unidade induzida (RRT) para que a amostra seja aprovada é de 70%. Portanto, o ensaio Lottman apresenta resultados satisfatórios para ambas as misturas. Comparando o resultado do lottman com o de adesividade, os ensaios demonstram controvérsia, pois ambos tratam de analisar a influência da umidade em misturas asfálticas. Porém o lottman analisa essa influência após a compactação e o de adesividade antes da mistura ser compactada. Então, pode-se dizer que a laterita e brita granítica não possuem adesividade ao ligante aceitável, porém as misturas compostas com esses agregados são resistentes ao efeito da água.

4.4.6 Estabilidade Marshall

Os resultados do ensaio de Estabilidade Marshall estão apresentados na Figura 19.

Figura 19: Resultado do ensaio de Estabilidade Marshall

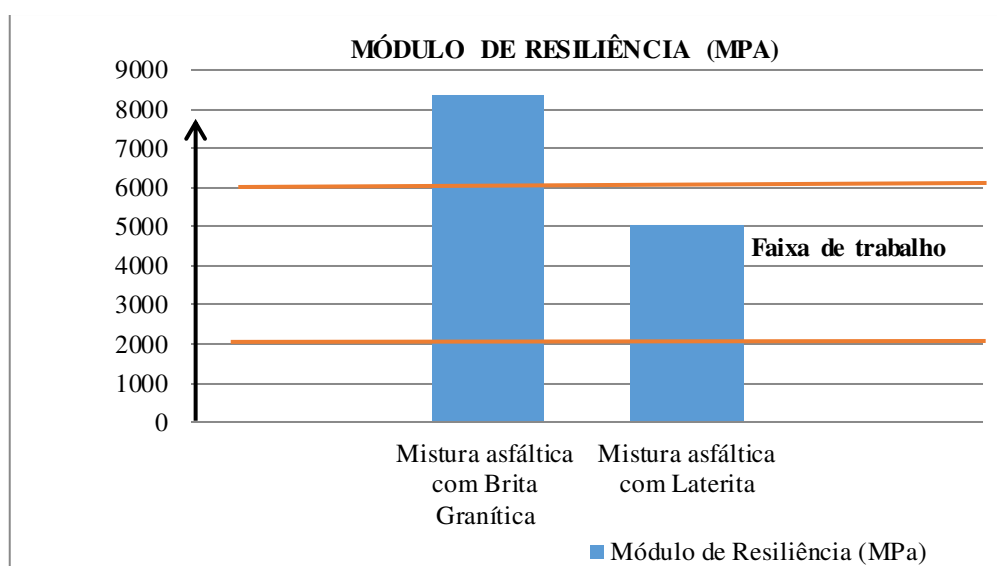


De acordo com a norma DNIT 031/2004-ES, o valor mínimo de estabilidade Marshall para concretos asfálticos utilizados em camadas de rolamento é de 500 Kgf, portanto tanto as misturas com agregado granítico quanto com agregado laterítico apresentam valores aceitáveis de estabilidade Marshall, com valores bem próximos. Apesar deste alto valor de estabilidade da mistura com laterita, em longo prazo, esta mistura pode se torna susceptível a oxidação, desintegração e conseqüentemente a diminuição da estabilidade, devido à alta porosidade da sua estrutura.

4.4.7 Módulo de Resiliência

Os resultados obtidos do ensaio de Módulo de Resiliência (MR) se encontram ilustrados na Figura 20.

Figura 20: Resultado do ensaio de MR para misturas asfálticas.

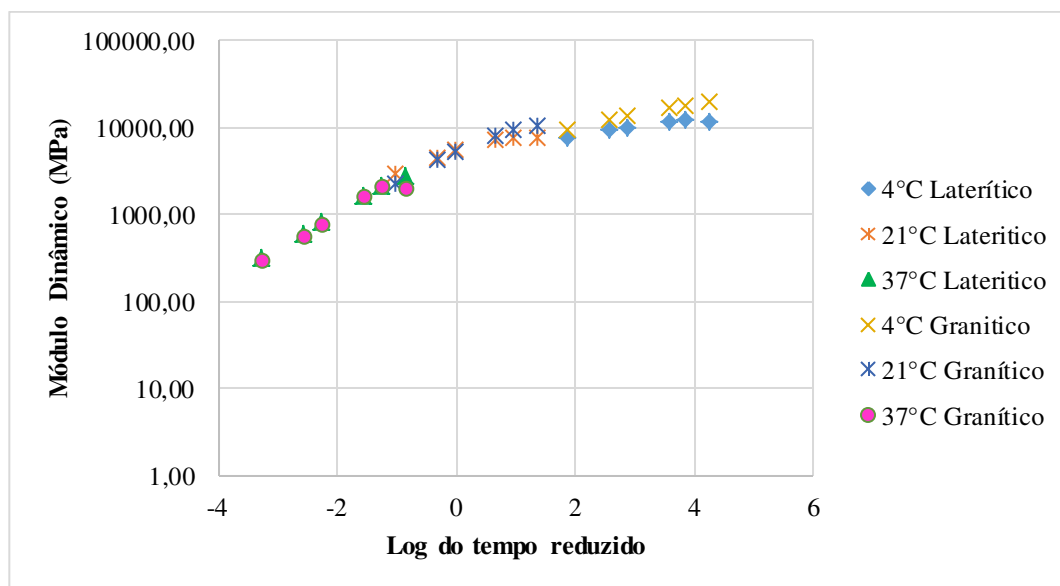


Bernucci *et al.* (2008) afirma que o módulo de resiliência de misturas asfálticas a quente varia com: o tipo de mistura (CA, SMA, CPA), a faixa granulométrica, o tipo de ligante asfáltico, as propriedades volumétricas, a energia de compactação, com a temperatura de compactação, com a temperatura de ensaio entre outras variáveis. Valores entre 2.000 a 8.000 MPa são aceitáveis para concretos asfálticos a 25 °C. Os valores de MR das misturas asfálticas se mostram satisfatórios para ambas as misturas.

4.4.8 Módulo Dinâmico

Os resultados obtidos do ensaio de Módulo Dinâmico (MD) se encontram ilustrados na Figura 21.

Figura 21: Gráfico de MD para misturas asfálticas com brita granítica.



As curvas mestras das misturas asfálticas com brita granítica e laterita foram elaboradas a partir dos dados de módulo dinâmico obtidos nas três temperaturas e seis frequências, por meio do processo de superposição tempo-temperatura na temperatura de referência de 21°C (COSTA, 2017). Otto (2009) afirma que os gráficos apresentam informações sobre o comportamento viscoelástico das misturas asfálticas, pois uma curva mestra cujos valores formam uma linha horizontal caracterizaria uma mistura com comportamento puramente elástico. Já uma curva próxima do vertical corresponderia a um concreto asfáltico muito susceptível às variações de frequência e de temperatura. Apesar de aparentemente apresentarem semelhanças gráficas, as misturas com agregado granítico revelam melhor comportamento quanto à rigidez. Para a temperatura de 37°C as misturas apresentam uma rigidez mais elevada em cerca de 40%, para 21°C de 30% e para as misturas a 4° C valores semelhantes, evidenciando que para baixas temperaturas as misturas asfálticas apresentam comportamento próximo, quanto à rigidez. Nota-se que a rigidez de ambas as misturas diminuíram à medida que a frequência de aplicação de carga diminuía.

5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos dos ensaios pode-se dizer que:

- durante a modelagem dos corpos-de-prova com a laterita foi comprovada a dificuldade no envolvimento do agregado com o CAP. Pois, a alta absorção da laterita, devido a sua porosidade, faz com que esse agregado necessite de um maior teor de CAP para seu completo envolvimento. A laterita apresentou baixa resistência ao desgaste químico (durabilidade), porém alta resistência ao desgaste mecânico (abrasão Los Angeles). Em relação à adesividade ao ligante se mostrou insatisfatória igualmente a brita granítica.
- os valores de Cântabro encontrados para as duas misturas estudadas permitiram concluir que o arrancamento progressivo de agregados da capa de rolamento por efeito do atrito pneu-pavimento (desgaste), patologia comum em revestimentos brasileiros, será maior na mistura com o uso da laterita. As misturas com laterita apresentam resultados superiores de Estabilidade Marshall. Apesar de pouca adesividade, as misturas com laterita apresentam alta resistência ao dano por umidade induzida. Todos os ensaios mecânicos apresentaram valores satisfatórios para ambas as misturas.
- as misturas asfálticas com agregado laterítico apresentam bom comportamento em relação ao trincamento por fadiga, enquanto que as misturas asfálticas com agregado granítico apresentou resultados inconclusivo.
- em relação ao ensaio de resistência a deformação permanente, o flow number, o resultado do ensaio foi inconclusivo para as misturas com laterita. Pode-se dizer que as misturas com brita granítica demonstram bom comportamento em relação a deformações permanentes.

Então, conclui-se que apesar do agregado laterítico apresentar características físicas inferiores a da brita granítica, esse fato não exerceu grande influência nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas, tendo em vista que maior parte dos resultados dos ensaios foram satisfatórios. Se faz necessário utilizar melhoradores de adesividade nas misturas e fica evidente que as misturas asfálticas com laterita consomem mais CAP devido a sua alta porosidade, encarecendo o produto final em virtude do CAP ser um material de alto custo. Deve-se avaliar para cada caso se é mais viável usar uma mistura com agregado laterítico ou transportar agregado granítico.

Portanto, o agregado laterítico se manifesta como uma alternativa para o uso em misturas asfálticas.

REFERÊNCIAS

AMARAL, Simone da C. Estudos de misturas laterita-asfalto da região metropolitana de Belém-PA para revestimento de pavimentos. 2004. 174p. Tese de doutorado-Escola Politécnica de São Paulo.

ALHASSAN,MUSA; *Permeability of the laterict soil traled with lime and rice husk ash*, Federal Universit of Technology Minna,techinal report, AUJ.T.,nº19,age2,pp.115-120,october,Nigéria,2008.

ASPHALT INSTITUTE. The asphalt handbook. Lexington: Manual series v. 4, 1989.

ASSIS, Sérgio Ricardo H. De. Utilização de agregados de rochas calcárias em misturas asfálticas usinadas a quente. 2015. 134 p. Dissertação de mestrado-UFPB. João Pessoa-PB.

BUDNY, J. Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas morna. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2012.

BERNUCCI, L.B.,MOTTA, L.M.G.,CERATTI, A.P.,SOARES, J.B. *Pavimentação Asfáltica : Formação Básica para Engenheiros*. 2ª ed. Rio de Janeiro: Petrobras,2008, v.1.

CHAGAS, Rodrigo Mendes Patrício. Estudo do concreto laterítico dosado com aditivo plastificante à base de lignosulfonato. 191p. Dissertação de mestrado-UFCG. Campina Grande, 2011.

CNT. *Boletim estatístico*,2017- Malha rodoviária. CNT, 2017.

CNT. *Pesquisa CNT de rodovias 2017* - Relatório gerencial de pesquisas de rodovias. CNT, 2017.

COSTA, Laiana Ferreira; LUCENA, Lêda C. de F.L.; PATRÍCIO, Jonny Dantas; MARINHO, Paulo G. Tavares. Avaliação do uso de agregados lateríticos em misturas asfálticas. 45º RAPv, 19º ENACOR. Brasília-DF. Setembro, 2016.

COSTA, Laiana Ferreira Da. Análise do uso das fibras do pseudocaule da bananeira em misturas asfálticas SMA. 161p. Dissertação de mestrado- UFCG. Campina Grande, 2017.

SPINDOLA and L. DANIEL, “Laterita e Solos lateríticos no Brasil,” 24, 2008.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes, ME 083/98. *Agregados – Análise Granulométrica*. Rio de Janeiro, 1998.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes, ME 081/98. *Agregados – Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo*. Rio de Janeiro, 1998.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes, ME 086/94. *Agregados – Determinação do Índice de Forma do agregado graúdo*. Rio de Janeiro, 1994.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes, ME 035/98. *Agregados – Determinação da Abrasão Los Angeles*. Rio de Janeiro, 1998.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes, ME 089/94. *Agregados – Avaliação da durabilidade pelo emprego de solução de sulfato de sódio ou magnésio*. Rio de Janeiro, 1994.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes, ME 163/98. *Materiais betuminosos- determinação da ductilidade*. Rio de Janeiro, 1998.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes, ME 131/2010. *Materiais betuminosos- Determinação do Ponto de Amolecimento- método Anel e Bola*. Rio de Janeiro, 1998.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes, ME 155/2010. *Materiais betuminosos -Determinação da Penetração*. Rio de Janeiro, 2010.

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

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes, ME 133/94. *Materiais betuminosos-Determinação do Módulo de Resiliência*. Rio de Janeiro, 1994.

DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes. *Manual de Pavimentação*. Rio de Janeiro, 1996.

DUTRA, Sônia Vanessa M. *Estado da arte sobre a utilização de solos lateríticos em pavimentos rodoviários*. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil-Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014.

IBP: Instituto Brasileiro de Petróleo. Informações Básicas sobre Materiais Asfálticos. IBP/Comissão de Asfalto. 6ª ed. rev. Rio de Janeiro, 1999.

IBRAHIM, A.; FAISAL, S.; JAMIL, N. Use of basalt in asphalt concrete mixes. *Construction and Building Materials* 23 (2009) 498-506.

FRAZÃO, E. B. (2010). Panorama da produção e aproveitamento de agregados para construção civil. Curso oferecido por Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral do Ministério de Minas e Energia e a Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC – em Programa de Capacitação de Gestores de Empresas Mineradoras de Agregados para a Construção Civil. Amazonas, 2010.

FREITAS, Hérica Braga De; MOTTA, Laura Maria G. Da. *Uso de escória aciaria em misturas asfálticas de módulo elevado*. *TRANSPORTES*, v. XVI, n.2, p. 5-12. Dezembro, 2008.

GUIMARÃES, A.C.R.; MOTTA, L.M.G. (2000). Execução de Revestimento Asfáltico com Agregado de Laterita Lavada do Acre – IBP – Rio de Janeiro.

LUCENA, Lêda C. de F.L. Verificação da influência do uso de resíduos industriais como filler em misturas asfálticas sob o efeito da presença d'água. 2009. 132p. Dissertação de Mestrado-UFCG. Campina Grande-PB.

LAVASANI, M.; NAMIN, M. L.; FARTASH, H. Experimental investigation on mineral and organic fibers effect on resilient modulus and dynamic creep of stone matrix asphalt and continuous graded mixtures in three temperature levels. *Construction and Building Materials*, v. 95, p. 232-242, 2015.

LEAL, Cláudio Luiz Dias. **Aproveitamento do bagaço de cana de açúcar em misturas asfálticas**. 2013. 219f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tese) – Tecnologia da Construção, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2013.

MARTÍNÉZ, G.S.S.; GEHLING, W.Y.Y.; BICA, A.V.D.; Análise da deformabilidade de solos lateríticos compactados. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, São Paulo, 2002.

MOIZINHO, J.C. (1994). Influência da Energia Térmica em Propriedades Mecânicas e Físicas de Agregados Lateríticos Utilizados em Concreto Betuminoso. Dissertação de Mestrado, UFPB. Paraíba. Brasil. 107p.

MOIZINHO, J. C. Caracterização e uso de agregados lateríticos do Distrito Federal e do Estado de Roraima em CBUQ, Tese de Doutorado. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2007.

MOTHÉ, M. G. *Estudo do comportamento de ligantes asfálticos por reologia e análise térmica*. Dissertação (Mestrado em Ciências)– Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Escola de Química, Curso de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos – EQ, 2009.

OLIVEIRA, D. R. C.; POMPEU NETO, B. B.; FUJIYAMA, R. T.; FERREIRA, M. De P. Propriedades mecânicas de concreto laterítico com metacaulim. Teoria e Prática na Engenharia Civil, n.17, p.25-31, 2011.

O. O. Amu, O. F. Bamisaye, and I. A. Komolafe, “The suitability and Lime Stabilization Requirement of Some Lateritic Soil Samples as Pavement,” 2011.

OTTO, G. G. (2009) *Misturas asfálticas mornas – Verificação da fadiga e do módulo complexo*. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC.

PAZOS, Abraham Guerrero. *Efeito de propriedades morfológicas de agregados no comportamento mecânico de misturas asfálticas*. 2015. 129p. Dissertação de mestrado – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE.

PAZOS, Abraham Guerrero; SACRAMENTO, Francisco Thiago; MOTTA, Laura Maria G. Da. *Efeitos de propriedades morfológicas de agregados no comportamento mecânico de misturas asfálticas*. 44º RAPv, 18º ENACOR. Foz do Iguaçu-PR. Agosto, 2015.

SANTOS, J. *Estabilização de argila laterítica do Distrito Federal para o uso em rodovias de baixo volume de tráfego*. 2004. 95f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

SHELL. *The Shell bitumen handbook*. 5. ed. London: Shell Bitumen/Thomas Telford Publishing, 2003.

SOUZA, Leonardo J.S. Estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas com cimento asfáltico de petróleo modificado com óleo de mamona. 2012.106p. Dissertação de mestrado- UFCG. Campina Grande-PB.

VALKERING, C.P.; LANCON, D.J.L.; HILSTER, E.D.; STOKER, D.A. 1990, Rutting resistance of asphalt mixes containing non-conventional and polymer modified binders. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 59, p.590-609.

WITCZAK, M. W.; KALOUSH, K.; PELLINEN, T. et al., 2002, Simple performance test for Superpave mix design, National Cooperative Highway Research Program – NCHRP Report 465, Washington, D. C., EUA.