

FACULDADE DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS DE EXTREMA –
FAEX

PRISCILA PANEQUE DE OLIVEIRA

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE ENVELHECIMENTO DOS LIGANTES
ASFÁLTICOS NAS MISTURAS

Extrema – MG

2018

PRISCILA PANEQUE DE OLIVEIRA

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE ENVELHECIMENTO DOS LIGANTES
ASFÁLTICOS NAS MISTURAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências Sociais Aplicadas de Extrema, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil. Orientadora: Prof. Ma. Luana Bernardete Dariva.

Extrema – MG

2018

PRISCILA PANEQUE DE OLIVEIRA

AValiação DOS EFEITOS DE ENVELHECIMENTO DOS LIGANTES
ASFÁLTICOS NAS MISTURAS

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado
como requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Civil, no Curso de
Engenharia Civil da Faculdade de Ciências
Sociais Aplicadas de Extrema.

Data de aprovação: 22 / 11 / 2018

Banca Examinadora:

Prof. Ma. Luana Bernardete Dariva

Orientadora

Faculdade de Ciências Sociais Aplicadas de Extrema

Prof. Renan Mariano

Faculdade de Ciências Sociais Aplicadas de Extrema

Prof. Marcelo Hermógenes

Faculdade de Ciências Sociais Aplicadas de Extrema

À Deus, aos meus pais Gilmar e Cilene, ao meu noivo e à toda minha família que sempre estiveram presentes em minha vida em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente à Deus, por me conceder saúde e sabedoria para ter chegado até aqui.

Em especial, aos meus pais, Gilmar e Cilene, pelo amor e paciência, por não medirem esforços para me proporcionar a oportunidade de estudar mesmo quando precisaram se poupar de algo, por depositarem toda confiança em mim me dando força, incentivo e apoio em todo o momento que precisei. Vocês são minha estrutura!

Agradeço também ao meu noivo André, pelo amor e companheirismo, pela atenção, paciência e disposição sempre que precisei.

O meu muito obrigada à toda minha família e amigos, que sempre me motivaram e torceram por mim no decorrer da faculdade.

Aos meus colegas de trabalho que me ajudaram no decorrer do projeto, o meu muito obrigada.

Agradeço à Deus por mais essa conquista em minha vida!

Enfim, muito obrigada a todos que me apoiaram e que de alguma forma contribuíram no decorrer desta jornada.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.”

José de Alencar

RESUMO

O pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construídas sobre uma superfície de terraplenagem, destinada a resistir as solicitações do tráfego de veículos e ações climáticas, proporcionando ao usuário conforto, segurança e economia. Pavimentos asfálticos são aqueles que compõe o revestimento da estrutura do pavimento, sendo empregados nos mesmos as solicitações dos veículos que são distribuídas a estrutura por completo. Com o passar dos anos o modal rodoviário vem sendo explorado e cada vez mais utilizado, sendo de extrema importância estudos de como pode haver melhorias nos pavimentos e um ganho de vida útil. Atualmente o foco maior nos estudos estão relacionados nos materiais empregados nas estruturas de pavimento, sendo desenvolvido técnicas que simulem em laboratório como se comportaria o pavimento asfáltico pós aplicação. O presente trabalho visa o estudo do envelhecimento do ligante asfáltico, e quais as diferenças em suas propriedades nas misturas asfálticas quando comparado com um ligante em estado natural, ou seja, sem sofrer envelhecimento. O método empregado para a simulação envelhecimento do ligante asfáltico foi a metodologia RTFOT, onde é possível se obter resultados de envelhecimento do ligante a curto prazo, ou seja, o envelhecimento no próprio processo de estocagem e usinagem. Com os ensaios realizados, concluiu-se que mesmo após sofrer o processo de envelhecimento, os resultados obtidos foram homogêneos, não apresentando variações consideráveis. Somente no ensaio de resistência à tração pôde-se observar que o corpo de prova realizado com o ligante envelhecido apresentou uma rigidez superior em relação ao corpo de prova com realizado com o ligante em estado natural, o que poderia não ser bom devido a perda da propriedade viscoelástica do ligante, podendo ocasionar assim microfissuras na camada.

Palavras Chave: Pavimento, Ligante asfáltico, Concreto asfáltico, Envelhecimento.

ABSTRACT

The pavement is a multilayer structure of finite thicknesses, built on an earthmoving surface, designed to withstand the demands of vehicular traffic and climatic actions, providing the user with comfort, safety and economy. Asphaltic pavements are those that make up the floor covering of the pavement, being used in them the requests of the vehicles that are distributed the structure completely. With the passing of the modal road years has been explored and increasingly used, being of extreme importance studies of how there may be improvements in pavements and a gain in useful life. Currently the major focus in the studies are related in the materials used in the pavement structures, being developed techniques that simulate in the laboratory how would behave the asphalt pavement after application. The present work aims at the study of the aging of the asphalt binder, and what are the differences in its properties in the asphalt mixtures when compared to a binder in the natural state, that is, without aging. The method used for the simulation of asphalt binder aging was the RTFOT methodology, where it is possible to obtain short term aging results of the binder, that is, aging in the process of storage and machining itself. With the tests carried out, it was concluded that even after undergoing the aging process, the results obtained were homogeneous, not showing considerable variations. Only in the tensile strength test could it be observed that the test piece performed with the aged binder showed a superior stiffness compared to the specimen with the binder in its natural state, which could not be good due to the loss of viscoelastic property of the binder, thus causing microcracks in the layer.

Key Words: Pavement, Asphalt Binder, Asphalt Concrete, Aging.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Malha rodoviária pavimentada por país (valores em km/1.000 km ²)	17
Figura 2: Malha rodoviária por tipo de rodovia	18
Figura 3: Estrutura do Pavimento	20
Figura 4: Esquema de grupos de revestimento	23
Figura 5: Classificação dos agregados.....	24
Figura 6: Exemplo de agregados de diferentes graduações.....	28
Figura 7: Exemplo de curvas granulométricas ilustrando os três tipos de graduações	28
Figura 8: Representação do ensaio de penetração	32
Figura 9: Representação do ensaio de ponto de amolecimento.....	32
Figura 10: Representação do ensaio de ponto de fulgor.....	33
Figura 11: Representação do equipamento de ensaio de recuperação elástica por torção	34
Figura 12: Representação do equipamento de ensaio de viscosidade Brookfield.....	35
Figura 13: Representação do ensaio de massa específica do CAP.....	35
Figura 14: Representação do ensaio de Envelhecimento do CAP	36
Figura 15: Representação dos recipientes cobertos após o ensaio RTFOT.....	36
Figura 16: Especificação Brasileira de Cimento Asfáltico de Petróleo.....	37
Figura 17: Agregados utilizados no trabalho.....	38
Figura 18: Ligante asfáltico utilizado no trabalho.....	39
Figura 19: RTFOT - Esquema do ensaio.....	46
Figura 20: Esquema para rompimento por compressão diametral	50
Figura 21: Rompimento do corpo de prova por compressão diametral	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Ensaio realizados.....	39
Tabela 2: Resultado das propriedades dos agregados	40
Tabela 3: Valores médios da análise granulométrica	40
Tabela 4: Resultados da caracterização do ligante antes e após seu envelhecimento	41
Tabela 5: Porcentagem de agregados utilizados na composição granulométrica da mistura ...	44
Tabela 6: Composição Granulométrica da mistura	44
Tabela 7: Densidade máxima teórica e densidade aparente utilizando CAP no estado natural	48
Tabela 8: Análise estatística dos dados	49
Tabela 9: Densidade máxima teórica e densidade aparente utilizando CAP envelhecido	49
Tabela 10: Análise estatística dos dados	49
Tabela 11: Tabela de Cargas	51
Tabela 12: Resistência à tração da mistura com CAP normal.....	53
Tabela 13: Resistência à tração da mistura com CAP envelhecido.....	53

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Curva granulométricas dos agregados utilizados	41
Gráfico 2: Penetração do ligante antes e após o envelhecimento.....	42
Gráfico 3: Ponto de amolecimento do ligante antes e após o envelhecimento.....	43
Gráfico 4: Viscosidade rotacional antes e após o envelhecimento.....	43
Gráfico 5: Curva granulométrica da mistura	45
Gráfico 6: Representação da propagação da força no rompimento do corpo de prova entre o CAP normal X CAP envelhecido	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

cm – Centímetro

cm³ - Centímetro cúbico

CNT - Confederação Nacional de Transportes

cP - Centipóise

CP - Corpo de Prova

CPA – Camada Porosa de Atrito

D – Diâmetro do corpo de prova

DMT – Densidade Máxima Teórica

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

ECS – *European Committee for Standardization*

ES – Especificação de Serviço

EUA – Estados Unidos da América

g – Gramas

H – Altura do corpo de prova

IBP – Instituto Brasileiro de Petróleo

Kgf - Quilograma força

Km – Quilômetro

Km² - Quilômetro quadrado

ME – Método de Ensaio

MEA – Massa Específica Aparente

mg - Miligrama

mm – Milímetros

MPa – Mega Pascal

N – Newton

NBR - Norma Brasileira de Regulamentação

RTFOT - *Rolling Thin Film Oven Test*

SMA - *Stone Matrix Asphalt*

% - Porcentagem

σ_R – Resistência à tração

° - Graus

°C – Graus Celsius

μm – Micrômetro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	Objetivo geral	15
1.2	Objetivo específico.....	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	A malha rodoviária brasileira	17
2.2	Conceito de pavimento	19
2.3	Subleito	20
2.4	Reforço do subleito	20
2.5	Sub-base e base	21
2.6	Revestimento	22
2.7	Agregados.....	23
2.7.1	Classificação dos agregados	23
2.7.2	Determinação das características do agregado	26
2.8	Misturas asfálticas.....	27
2.9	Composição das misturas	28
2.10	Ligantes asfálticos.....	29
2.11	Cimento asfáltico	30
2.12	Emulsão asfáltica	30
2.13	Asfalto modificado.....	30
2.14	Asfaltos diluídos.....	31
2.14.1	Ensaio de Penetração (ASTM D5-94 e NBR 6576)	31
2.14.2	Ponto de Amolecimento (ASTM D-36 e NBR 6560)	32
2.14.3	Ponto de Fulgor (ASTM D 92 e NBR 11341).....	33
2.14.4	Recuperação Elástica por Torção (DNIT 130/2010 - ME).....	33
2.14.5	Viscosidade Rotacional <i>Brookfield</i> (ASTM D-4402 e NBR 15184).....	34
2.14.6	Massa Específica do CAP (NBR 6296).....	35
2.14.7	Envelhecimento pelo RTFOT (ASTM D-2872 e NBR 15235).....	36
3	MATERIAIS, MÉTODOS E RESULTADOS	38
3.1	Materiais.....	38

3.1.1	Agregados	38
3.1.2	Ligante asfáltico.....	39
3.2	Métodos utilizados	39
3.2.1	Agregados	40
3.2.2	Ligante asfáltico.....	41
3.2.3	Dosagem da mistura asfáltica	43
3.2.4	Envelhecimento do ligante asfáltico	45
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO	48
5	CONCLUSÃO	54
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

1 INTRODUÇÃO

Atualmente o modal mais utilizado no Brasil é o rodoviário, principalmente no transporte de cargas e pessoas, o que contribui significativamente para o desenvolvimento socioeconômico do país. Diversas pesquisas sobre a condição dos pavimentos rodoviários no Brasil são realizadas a fim de promover melhorias no conforto para o usuário, segurança, vida útil dos pavimentos e claro identificando suas principais deficiências.

Com o crescimento da demanda pelo modal rodoviário, diversas rodovias brasileiras são concessionadas por órgãos privados no qual os mesmos fazem a cobrança de pedágios, como subsídio para as melhorias em todo o sistema rodoviário. A grande dificuldade das concessionárias de rodovias hoje é manter o pavimento asfáltico íntegro, devido às patologias que são ocasionadas com o tempo, tráfego e excesso de cargas. Essas patologias, podem ocorrer devido às falhas de execução, materiais contaminados, e até mesmo por um mal controle de qualidade, tanto nas respectivas usinas e laboratórios, quanto na aplicação em campo.

Uma patologia comumente apresentada no pavimento, devido às tensões e deformações que estão associadas ao tráfego, é o trincamento na camada asfáltica, sendo ela por fadiga, pelo envelhecimento do ligante asfáltico e pelas condições e ações climáticas que a camada asfáltica está sujeita.

Com as pesquisas realizadas tanto por universidades quanto concessionárias, existem diversas misturas asfálticas a quente para cada caso específico de solicitação de tráfego, local de aplicação e clima. O presente trabalho tem como objetivo principal analisar duas misturas asfálticas à quente, dosadas em laboratório, utilizando Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 30-45, sendo uma mistura elaborada com o CAP convencional, sem modificações, e a outra mistura, com o mesmo CAP após o seu envelhecimento para que se possa avaliar e comparar o comportamento do CAP envelhecido quanto a rigidez da camada.

Em ambas as misturas utilizadas para realizar os ensaios, foram empregados o método de dosagem Marshall, utilizando a faixa “C” do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem por objetivo analisar duas misturas asfálticas à quente, dosadas em laboratório, utilizando o Cimento Asfáltico de Petróleo – CAP 30-45. Dentro das duas misturas a serem realizadas, uma será com o CAP convencional, em seu estado natural, sem modificações e a outra mistura com o mesmo CAP, porém, após sofrer o processo de envelhecimento.

1.2 Objetivo específico

Comparar resultados sobre o envelhecimento do ligante asfáltico, levando em consideração o possível aumento de rigidez, podendo assim reduzir a vida útil do pavimento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

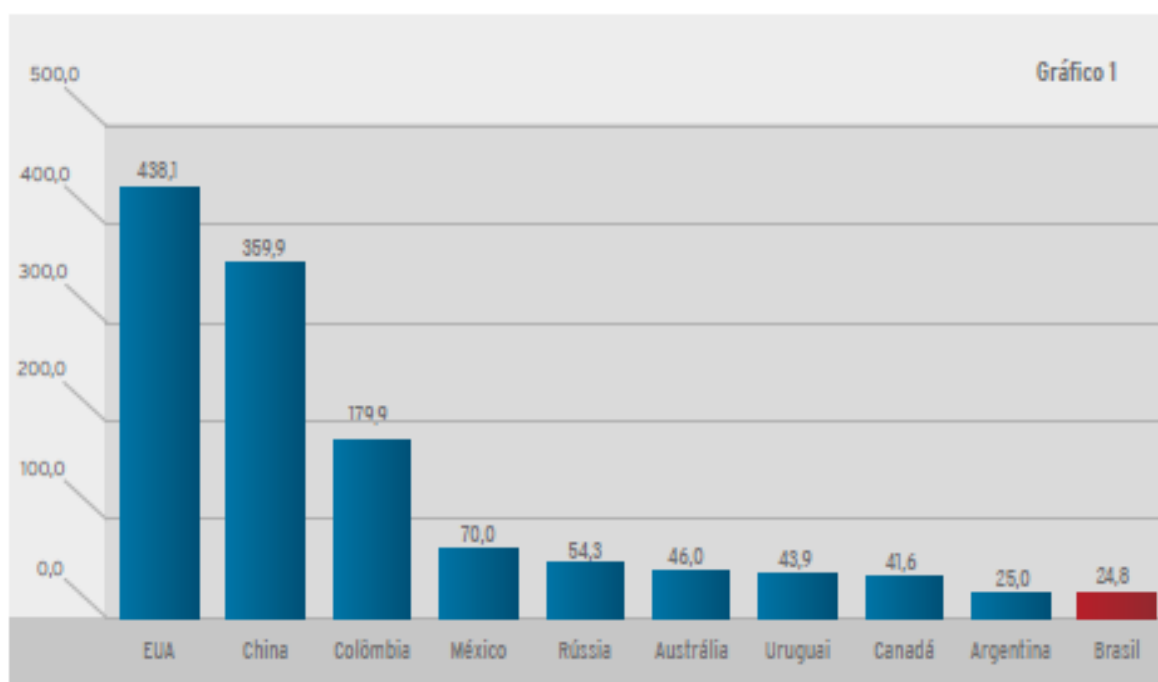
Neste item será apresentado um levantamento bibliográfico a respeito dos pavimentos, como é formada sua estrutura, camadas de revestimentos, tipos de agregados, composição das misturas asfálticas, ligantes asfálticos e os ensaios realizados para a caracterização do mesmo.

2.1 A malha rodoviária brasileira

A malha rodoviária no Brasil ainda é muito pequena, mesmo bastante solicitada, por ser o modal rodoviário de maior utilização para transporte de cargas. O pavimento asfáltico tornou-se uma importante ferramenta de pesquisa, onde o objetivo é que as solicitações dos veículos não ocasionem danos a estrutura diminuindo-se a vida útil do mesmo (CNT, 2017).

A Pesquisa CNT (2017) também aponta que a malha rodoviária nacional é de aproximadamente 212.866 km de rodovias pavimentadas e 1.365.426 km de rodovias não pavimentadas, o que torna o Brasil um país com malha rodoviária pavimentada pequena em relação a outros países, como mostra a Figura 1:

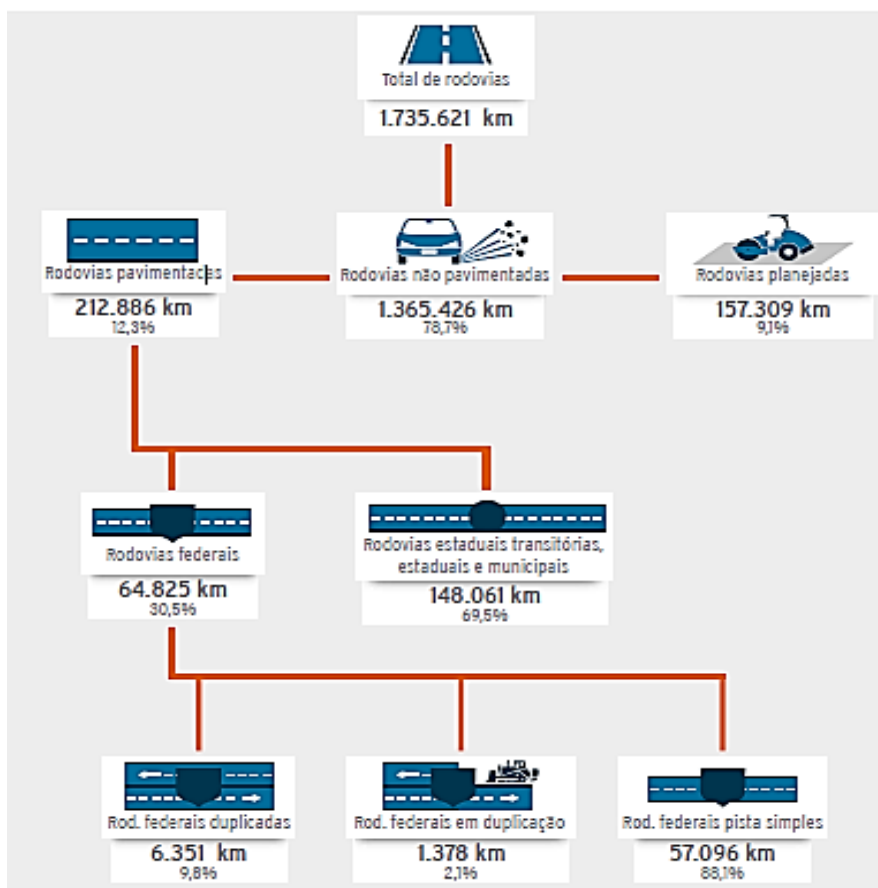
Figura 1: Malha rodoviária pavimentada por país (valores em km/1.000 km²)



Fonte: Pesquisa CNT 2017

Com isso pode se dividir a malha rodoviária brasileira de acordo com o tipo de gestão e o tipo de rodovia, como se vê na figura 2:

Figura 2: Malha rodoviária por tipo de rodovia



Fonte: Pesquisa CNT 2017

Ao se aumentar a implantação de rodovias pavimentadas, propiciaria uma melhor integração entre as regiões do país e a criação de novas possíveis rotas para o escoamento de produtos, reduzindo, assim, os custos logísticos e aumentando a competitividade dos produtos nacionais (CNT, 2017).

Segundo Senço (2001), nas últimas décadas, os métodos construtivos têm evoluído, de um volume de cerca de dezenas de quilômetros por ano, passou-se a ter centenas de quilômetros por ano de rodovias pavimentadas, tendo-se também um aumento na eficiência de execução, melhora nos serviços, os materiais passaram a ser mais estudados resultando em economia e o controle de execução passou a ser mais rotineiro. Na medida em que a rede rodoviária pavimentada passou a representar um altíssimo patrimônio, os métodos de conservação mais e mais tiveram de ser aprimorados, levando-se em conta que os veículos

trafegam por vias concluídas e não por vias em construção. Essa regra primária exige que, numa escala de prioridades, a conservação das rodovias assuma lugar de destaque e qualquer descuido é fatal e provocará o acúmulo de serviços ano a ano.

2.2 Conceito de pavimento

Segundo Bernucci et. al., (2006), o pavimento de um ponto de vista estrutural e funcional, é uma estrutura com múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre uma superfície de terraplenagem com intuito de ser técnica e economicamente a resistir esforços quando solicitado pelo tráfego de veículos e do clima, e proporcionar ao usuário uma melhoria nas condições de rolamento, com conforto e segurança.

Para Balbo (2007), pavimentar é a construção de uma estrutura que tem por objetivo principal a melhoria operacional do tráfego, independentemente de sua natureza, onde permite-se maior conforto no deslocamento e mais segurança com as alterações de condições da pista e do clima e pavimento é uma estrutura não perpétua, composta por camadas sobrepostas de diferentes tipos de materiais compactados, conformada para atender estrutural e operacionalmente o tráfego, de maneira durável e com menor custo possível.

Pavimento é a superestrutura de uma rodovia, constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentadas sobre um espaço considerado teoricamente infinito, chamado de infraestrutura ou terreno de fundação, a qual é designada de subleito. (MANUAL DNIT, 2006).

No geral os pavimentos podem ser classificados como flexíveis, semirrígidos e rígidos e segundo Manual DNIT (2006):

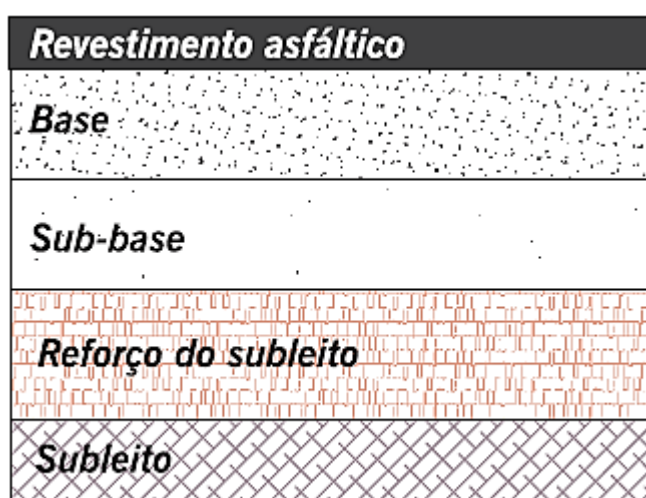
- Pavimento Flexível é aquele em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e assim a carga distribui-se em parcelas entre as camadas.
- Semirrígidos é aquele que possui uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias.
- Rígido é aquele que o revestimento tem uma elevada rigidez em relação as camadas inferiores e assim absorve praticamente todas as tensões de carregamento.

E por fim, segundo Manual DNIT (2006), o pavimento por injunções econômicas e técnicas é uma estrutura de camadas onde diferentes materiais de diferentes deformabilidades

são colocadas em contato com finalidade de se assegurar uma estrutura íntegra quando sujeitas às cargas impostas pelo tráfego.

A estrutura do pavimento é composta de múltiplas camadas, como é mostrado na figura 3, cada camada tem uma finalidade de absorção de cargas, onde o revestimento é submetido aos esforços de compressão e tração devidos à flexão, e as outras camadas principalmente à compressão, onde as mesmas distribuem-se para o subleito, ou seja, a fundação da estrutura. (BERNUCCI et. al., 2006).

Figura 3: Estrutura do Pavimento



Fonte: BERNUCCI, et. al.,2006

2.3 Subleito

Segundo manual DNIT (2006), subleito é a camada considerada infinita para efeitos de dimensionamento de pavimentos, onde ele deve ser estudado e considerado até a profundidade onde atuam as cargas provenientes do tráfego.

De acordo com DNER ES 299 (1997), a regularização do subleito é a operação destinada a conformar o leito da estrada, transversalmente e longitudinalmente, obedecendo as larguras e cotas constantes das notas de serviço de terraplenagem do projeto, compreendendo cortes ou aterros e o material empregado nessa camada é preferencialmente o próprio material do leito do terreno onde será aplicada a rodovia.

2.4 Reforço do subleito

A norma DNIT ES 138/2010 define reforço do subleito como a camada estabilizada granulométricamente, executada sobre o subleito devidamente compactado e regularizado, utilizada quando se tornar necessário reduzir espessuras elevadas da sub-base, originadas pela baixa capacidade de suporte do subleito e os materiais empregados nesta camada podem ser solos, misturas de solos ou materiais rochosos com características físicas melhores que os materiais empregados do subleito, a fim de se garantir uma melhor resistência e distribuição de cargas na estrutura.

2.5 Sub-base e base

Segundo Manual DNIT (2006), as bases e sub-bases podem ser divididas em rígidas e semirrígidas, e sua utilização depende da composição da estrutura do pavimento e pode-se utilizar diversos materiais para uma melhora de resistência como:

- **Estabilização Granulométrica**

São camadas compostas por solos, britas de rochas, escória de alto forno ou ainda a mistura desses materiais, são camadas flexíveis e são estabilizadas granulométricamente por compactação de um material ou de uma mistura de materiais que apresentem granulometria apropriada.

- **Macadame Hidráulico ou Seco**

É uma camada de brita de graduação aberta de tipo especial (Macadame), que após compactação tem seus vazios preenchidos por material de enchimento, constituído de finos de britagem ou mesmo por solos de granulometria e plasticidade apropriadas, a penetração do mesmo é realizada por irrigação no caso do macadame hidráulico ou por apenas espalhamento no caso de macadame seco, o que pode simplificar o processo e evitar encharcamento do subleito.

- **Solo-cimento**

São camadas compactadas com uma mistura de solo, cimento e água onde deve-se garantir certos requisitos de densidade, durabilidade e resistência.

- **Solo Melhorado com Cimento**

Este tipo de camada caracteriza-se pela adição de pequenas quantidades de cimento, visando primordialmente a modificação do solo no que se refere a sua plasticidade e sensibilidade a água, sem cimentação.

- Solo-Cal

Este tipo de camada caracteriza-se pela adição de cal, visando primordialmente a modificação do solo no que se refere a sua plasticidade, sensibilidade e carbonatação que é uma cimentação fraca.

- Solo Melhorado com Cal

É uma mistura que primordialmente visa a modificação da plasticidade, por pequenas adições de cal.

- Solo Betume

Caracteriza-se uma mistura flexível, composta de solo, água e material betuminoso.

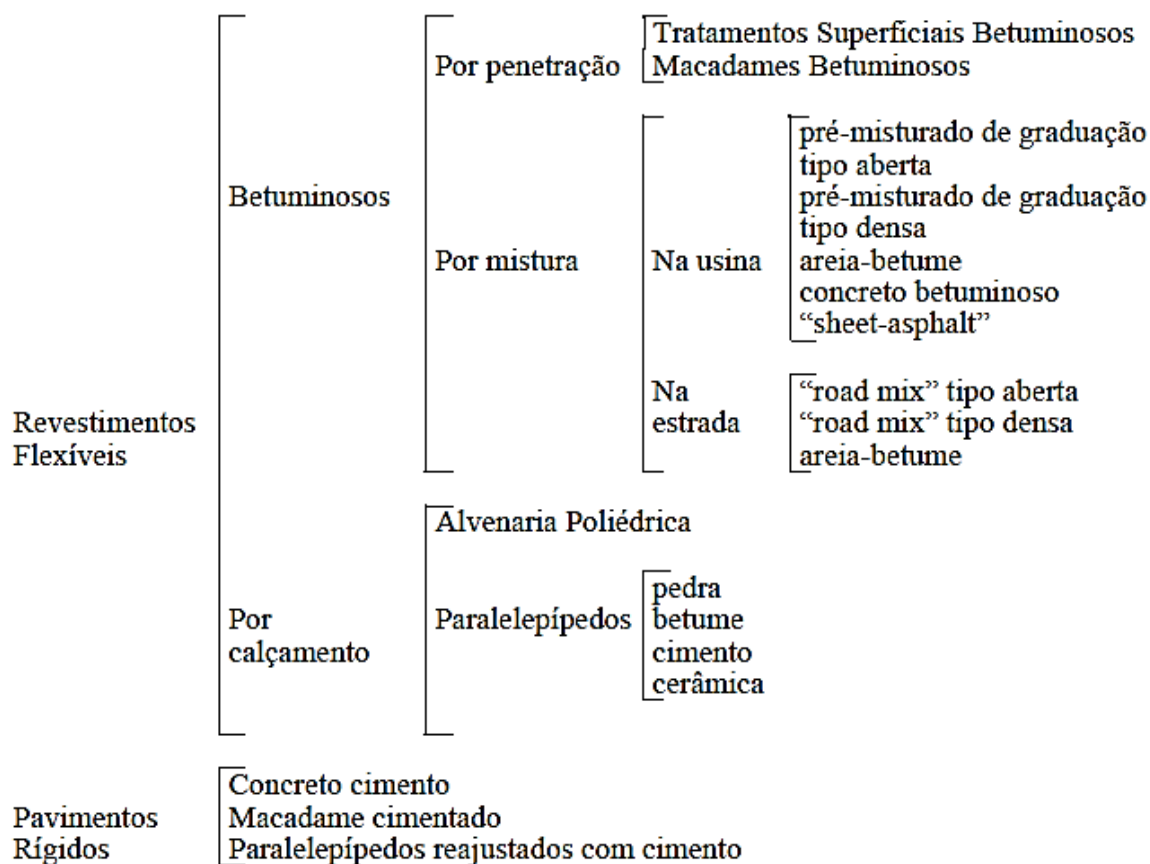
2.6 Revestimento

O revestimento asfáltico é a camada destinada a receber diretamente as cargas de tráfego e ações climáticas. Nos pavimentos, existem diversas camadas que compõem sua estrutura, porém, é o revestimento asfáltico que deve ser o mais resistente, impermeável, durável e estável possível para resistir aos esforços solicitantes garantindo assim maior conforto e segurança ao usuário (BERNUCCI et. al., 2006).

Senço (2001, p.163) afirma que o revestimento “é a camada mais nobre do pavimento, devendo a sua execução ser procedida de detalhados ensaios de dosagem e acompanhada por rigorosos ensaios de controle”.

Os revestimentos podem ser divididos em grupos, como mostra o esquema a seguir: (DNER, 1996).

Figura 4: Esquema de grupos de revestimento



Fonte: DNER, 1996

2.7 Agregados

Para Senço (2007), de um modo geral na engenharia civil, os agregados são materiais granulares, inerentes, sem forma e dimensões definidas podendo ser utilizados para diversos tipos de obra.

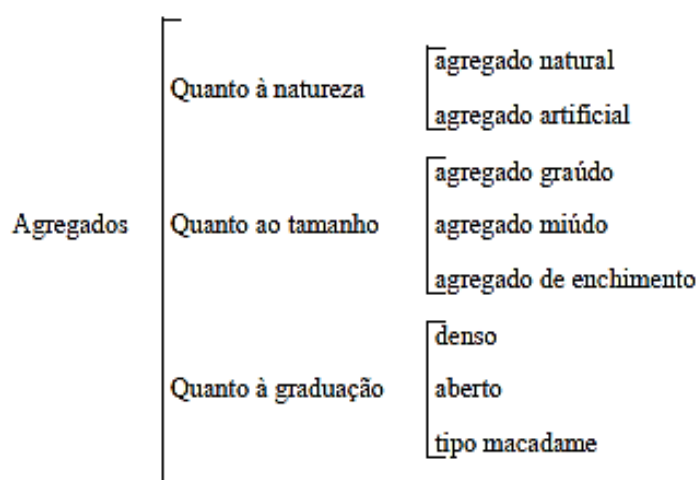
Os agregados utilizados na pavimentação podem ter suas aplicações destinadas a misturas betuminosas, lastro de obras, concreto de cimento e outros. Quando empregado em misturas, os agregados têm a maior representação em volume em relação aos demais componentes. (SENÇO, 2007).

2.7.1 Classificação dos agregados

Conforme Bernucci et. al., (2006), o desempenho de um serviço, está ligado diretamente com as propriedades geológicas da rocha de origem de um determinado agregado. Por isso, deve-se atentar sempre às informações sobre o tipo de rocha, composição mineralógica, química, sua tendência à degradação, abrasão, grau de alteração entre outros.

De acordo com o Manual de Pavimentação DNER (1996), os agregados comumente utilizados em pavimentação podem ser de origem natural ou artificial, e classificados quanto à natureza, tamanho e sua graduação (distribuição dos grãos), conforme figura 5.

Figura 5: Classificação dos agregados



Fonte: DNER, 1996

Em relação à natureza das partículas:

- Agregados naturais

São constituídos de grãos oriundos da alteração das rochas pelo processo de intemperismo ou produzidos por processos de britagem: pedregulhos, seixos, britas, areia, etc.

- Agregados artificiais

São aqueles em que os grãos são produtos ou subprodutos de processo industrial por transformação física e química do material: escória de alto forno, argila calcinada, argila expandida.

Em relação ao tamanho individual dos grãos:

- Agregado graúdo

Material retido na peneira nº 10 (2,0 mm), exemplo: brita, cascalhos, seixos, etc.

- Agregado miúdo

Material que passa na peneira nº 10 (2,0mm) e fica retido na peneira nº 200 (0,075mm), exemplo: pó de pedra, areia, etc.

- Material de enchimento (filler)

Material que passa pelo menos 65% na peneira nº 200 (0,075mm), exemplo: cal extinta, cimento Portland, etc.

Em relação à distribuição ou graduação dos grãos:

- Agregado de graduação densa

É aquele que apresenta uma curva granulométrica de material bem graduado e contínua, com quantidade de material fino, suficiente para preencher os vazios entre as partículas maiores.

- Agregado de graduação aberta

É aquele que apresenta uma curva granulométrica de material bem graduado e contínua, com insuficiência de material fino, para preencher os vazios entre as partículas maiores.

- Agregado tipo macadame

Possui partículas de um único tamanho, o chamado “*one size aggregate*”. Trata-se, portanto, de um agregado de granulometria uniforme onde o diâmetro máximo é, aproximadamente, o dobro do diâmetro mínimo.

Em relação à forma do agregado, Senço (2007) diz que há grande evidência entre o comportamento de um grão cúbico ou esférico em relação a um grão alongado ou chato sob a ação do tráfego. Devido a isso, deve-se ressaltar que a forma externa do agregado contribui na definição de suas propriedades e características.

As características que estão associadas à forma dos agregados são ligadas ao grau de esfericidade e grau de arredondamento.

O grau de esfericidade é definido por grãos com características semelhantes a forma de esfera, podendo ser:

- Esferoidais

Grãos que apresentam certa simetria em relação ao centro e os que mais se aproximam da esfera.

- Achatados

Um plano de apoio aproximadamente circular com pequenas espessuras, e assemelham-se a um disco.

- Prismáticos

Tem dimensão predominante em relação às outras duas, e se assemelham a um bastão.

- Lamelares

Pode ser definida como aquela em que a maior dimensão é superior a seis vezes a menor dimensão.

Já o grau de arredondamento está ligado à resistência mecânica e à abrasão da rocha-mãe, assim como as solicitações que as partículas podem sofrer ao longo do tempo, e suas características podem ser:

- Angulosos

Têm todos os cantos vivos e não indicam desgaste por abrasão.

- Subangulares

Possuem cantos mais suaves, embora tenham raio de curvatura bem pequenos, indicam que a maior parte do agregado ainda não sofreu abrasão.

2.7.2 Determinação das características do agregado

Conforme o Manual de Pavimentação DNER (1996), as características dos agregados possibilitam fácil diferenciação do material, de modo que seja efetuada a escolha correta de aplicação, comprovando sua uniformidade e permitindo que o material resista apropriadamente aos esforços e cargas solicitantes pelo pavimento.

Para os serviços de pavimentação, as características que devem ser levadas em conta são:

- Granulometria

A granulometria do agregado representada pela curva de distribuição granulométrica, é uma das características que asseguram estabilidade aos pavimentos, em consequência do maior atrito interno obtido por entrosamento das partículas, desde a mais graúda à partícula mais fina.

- Forma

Segundo Bernucci et. al., (2006), a forma das partículas dos agregados influencia na trabalhabilidade e resistência ao cisalhamento das misturas asfálticas.

Os agregados que apresentam forma cúbica, são comumente empregados na construção de revestimentos asfálticos do tipo tratamento superficial. Já os agregados que apresentam formas lamelares ou alongadas, em revestimento por mistura. (DNER, 1996).

- Absorção de Água

De acordo com o método de ensaio DNER-ME 081/98, (1998), a absorção de água é o preenchimento dos vazios permeáveis, ocorrendo o aumento da massa de agregado.

A quantidade de água que um agregado absorve quando está imerso, é o que indica o quão poroso esse agregado é. Portanto, quanto mais poroso é o agregado, conseqüentemente irá absorver mais ligante (BERNUCCI et. al., 2006).

2.8 Misturas asfálticas

Segundo Bernucci et al., (2006), as misturas asfálticas a quente podem ser subdivididas pela graduação dos agregados e *filler* (material de enchimento) e os três tipos mais usuais nas misturas a quente são os listados a seguir, sendo que todos eles podem ser empregados como revestimento de pavimentos de qualquer volume de tráfego, desde o muito baixo até o muito elevado.

- Concreto asfáltico de graduação densa

Possui curva granulométrica contínua e bem graduada de forma a proporcionar uma composição com poucos vazios. Os concretos asfálticos densos são as misturas asfálticas usinadas a quente mais utilizadas como revestimentos asfálticos de pavimentos no Brasil. Suas propriedades, no entanto, são muito sensíveis à variação do teor de ligante asfáltico. Em excesso ou em falta, o ligante pode gerar problemas de deformação permanente e de perda de resistência, levando à formação de trincas (BERNUCCI et. al., 2006).

- Mistura de graduação aberta

Tem curva granulométrica uniforme com agregados quase que exclusivamente de um mesmo tamanho. Diferentemente do concreto asfáltico, mantém uma grande porcentagem de vazios com ar não preenchidos graças às pequenas quantidades de *filler*, de agregado miúdo e de ligante asfáltico. Isso faz com que esse revestimento seja drenante, possibilitando a percolação de água no interior da mistura asfáltica. Enquadra-se nessa categoria a chamada mistura asfáltica drenante, conhecida no Brasil por camada porosa de atrito (CPA) e comumente empregada como camada de rolamento quando se quer aumentar a aderência pneu-pavimento sob a chuva (BERNUCCI et. al., 2006).

- Mistura de graduação descontínua

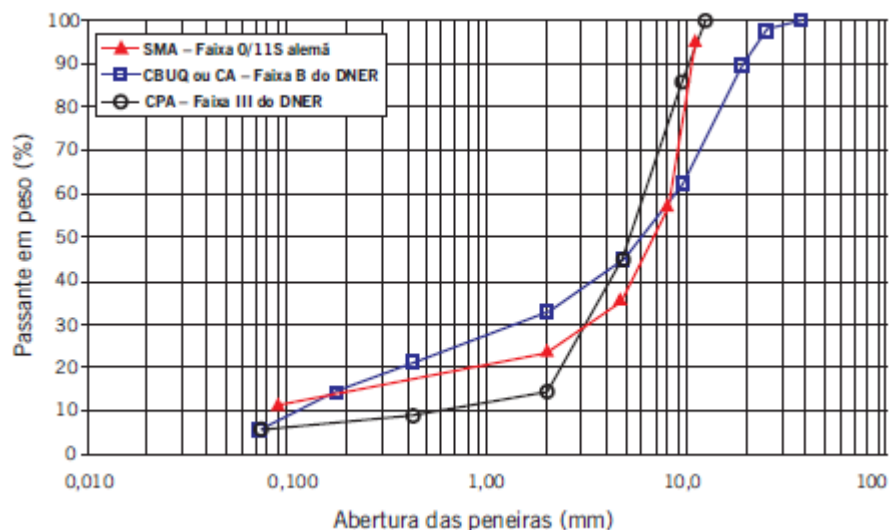
Os revestimentos desse tipo têm maior quantidade de grãos de grandes dimensões em relação aos grãos de dimensões intermediárias, completados por certa quantidade de finos. O resultado é um material mais resistente à deformação permanente com o maior número de contatos entre os agregados graúdos. Enquadra-se nessa categoria o *Stone Matrix Asphalt* (SMA), geralmente aplicado em espessuras variando entre 1 cm, 5 cm e 7 cm e caracterizado pela macrotextura superficialmente rugosa e pela eficiente drenagem superficial (BERNUCCI et. al., 2006).

Figura 6: Exemplo de agregados de diferentes graduações



Fonte: BERNUCCI, et. al.,2006

Figura 7: Exemplo de curvas granulométricas ilustrando os três tipos de graduações



Fonte: BERNUCCI, et. al.,2006

2.9 Composição das misturas

A caracterização de materiais de pavimentação é uma tarefa complexa em virtude de as propriedades desses materiais dependerem de diversos fatores. No caso de misturas asfálticas, o envelhecimento gradativo devido à oxidação do ligante aumenta a complexidade, já que é difícil a simulação desse fenômeno em laboratório para a devida caracterização do material. Diante disso, a caracterização das misturas requer um balanço apropriado entre rigor e praticidade, portanto, os aspectos que se destacam são o de maior relevância para previsão do comportamento das misturas asfálticas em campo. Para a composição da mistura, geralmente são utilizados os seguintes materiais:

- Materiais betuminosos;
- Agregados graúdos;
- Agregados miúdos;
- *Filler*;

2.10 Ligantes asfálticos

Hoje em dia, quase todo o asfalto em uso, é obtido do processamento de petróleo bruto em refinarias, porém também podem ser obtidos em lagos e poços de petróleo. Segundo o *Asphalt Institute* dos EUA (2007), ligantes asfálticos de petróleo ou apenas ligantes asfálticos são os cimentos asfálticos com ou sem a adição de agentes modificadores, os quais não devem ser maiores do que 250 μm . Para que o ligante asfáltico tenha um desempenho satisfatório no pavimento, ele deve apresentar propriedades diferenciadas no que diz respeito ao seu comportamento, ligante deve apresentar maior coesão e adesão aos agregados, grande resistência ao envelhecimento, susceptibilidade térmica adequada a faixa de utilização de temperatura do pavimento, alta resistência à fadiga e à deformação térmica. No Brasil, utiliza-se a denominação CAP – Cimentos Asfálticos de Petróleo – para designar ligantes semissólidos a temperaturas baixas, visco elásticos a temperatura ambiente, líquidos à altas temperaturas, e que se enquadram em limites de consistência para determinadas temperaturas de modo a distingui-los dos asfaltos utilizados na construção civil e para finalidades industriais.

De acordo com a ECS (2000), asfalto é definido como um material à prova d'água, aglutinante, completamente solúvel em tolueno, muito viscoso, quase com um comportamento de sólido a temperatura ambiente, podendo ser obtido pelo refino do óleo cru ou estar presente na natureza.

Os asfaltos de petróleo podem ser divididos em basicamente dois tipos: os destinados a pavimentação e os destinados a indústria, os asfaltos para pavimentação são:

2.11 Cimento asfáltico

Segundo o DNER (1996), o cimento asfáltico é obtido especialmente para apresentar características adequadas para o uso na construção de pavimentos, podendo ser obtido pela destilação do petróleo em refinarias. O cimento asfáltico de petróleo, CAP, é um produto obtido no fundo da torre de destilação a vácuo, de acordo com as especificações brasileiras. São flexíveis, impermeáveis, aglutináveis e resistentes a ação da maioria de ácidos, sais e álcalis.

2.12 Emulsão asfáltica

Segundo o DNER (1996), a emulsão é uma dispersão coloidal de uma fase asfáltica em uma fase aquosa, ou de uma fase aquosa dispersa em uma fase asfáltica, tendo a participação de um agente emulsificante. Os agentes emulsificantes podem ser aniônicos ou catiônicos. Os agentes emulsificantes aniônicos são sabões, no qual o ânion (orgânico) está associado a um álcali, como o estearato de sódio, que é solúvel no betume. Os agentes emulsificantes catiônicos normalmente são os sais de amina. A adição dos agentes emulsificantes ocorre na proporção de 1,5/100 na emulsão. Na emulsão asfáltica, o fenômeno de separação entre o material betuminoso e a água é denominado de ruptura da emulsão.

2.13 Asfalto modificado

O IBP (1999) conclui que os asfaltos modificados podem ser por polímeros, por agentes rejuvenescedores e por produtos naturais. A adição dos polímeros no CAP pode melhorar as propriedades físicas e mecânicas no ligante com a diminuição da suscetibilidade térmica, aumento de resistência a deformação e etc.

Os agentes rejuvenescedores são utilizados na reciclagem de revestimento de forma a reduzir a viscosidade e de reposição dos compostos aromáticos do ligante envelhecido, restabelecendo assim, suas características químicas e físicas (IBP, 1999).

São adicionados produtos naturais (fibras, asfalto natural, enxofre) ao cimento asfáltico de petróleo de forma a melhorar algumas das características mecânicas. No entanto, estes ligantes têm sido pouco utilizados na pavimentação devido ao alto desempenho dos asfaltos modificados por polímeros (IBP, 1999).

2.14 Asfaltos diluídos

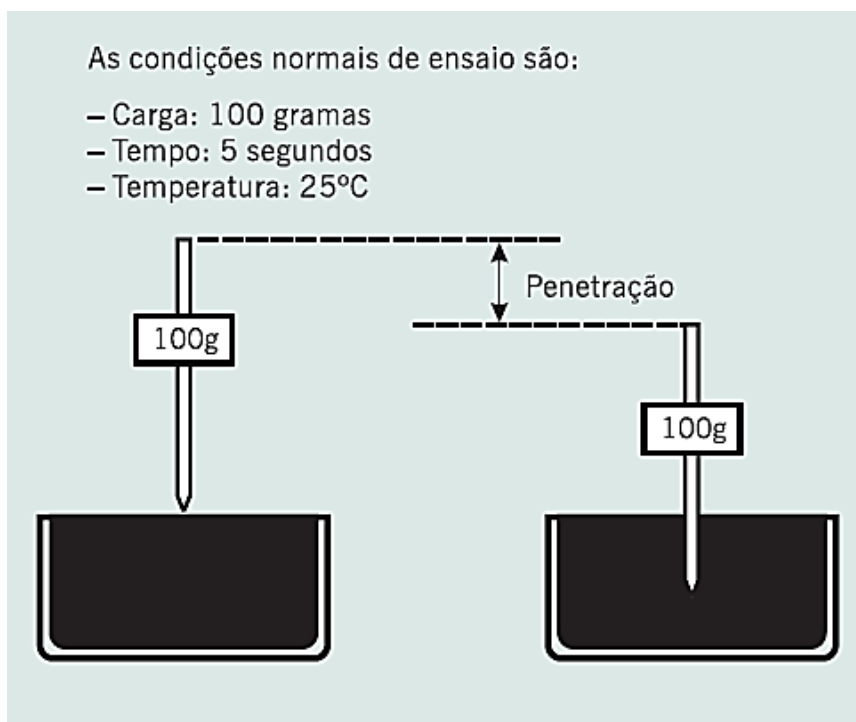
Segundo o DNER (1996), os asfaltos diluídos são cimentos asfálticos diluídos em solventes derivados do petróleo com volatilidade apropriada de forma a descartar o aquecimento do CAP ou utilizar um aquecimento moderado. Esses solventes adicionados ao CAP atuam como facilitadores no serviço de pavimentação, pois, uma vez que ocorre a evaporação total do solvente, após a aplicação do asfalto diluído, o resíduo é o próprio CAP.

Para os ensaios realizados nos ligantes asfálticos, primeiramente é realizado a coleta do material e assim, posteriormente, realizada a caracterização do material com os ensaios que seguem:

2.14.1 Ensaio de Penetração (ASTM D5-94 e NBR 6576)

Segundo Bernucci et. al., (2006), o ensaio de penetração consiste em anotar a profundidade em décimos de milímetros que uma agulha de massa padronizada de 100g penetra numa amostra de cimento asfáltico por 5 segundos a uma temperatura de 25°C.

Figura 8: Representação do ensaio de penetração

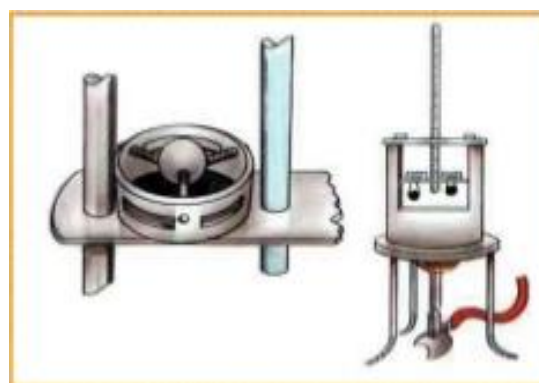


Fonte: BERNUCCI, et. al.,2006

2.14.2 Ponto de Amolecimento (ASTM D-36 e NBR 6560)

Este ensaio determina a temperatura em que uma esfera de aço empurra um corpo de prova, constituído de um disco de amostra contido num anel metálico. O ponto de amolecimento é a temperatura em que a amostra amolece, permitindo que a esfera empurre o disco até tocar uma referência. Este ensaio também é denominado como método do anel e bola. (ABNT NBR 6560:2016, 2016).

Figura 9: Representação do ensaio de ponto de amolecimento.

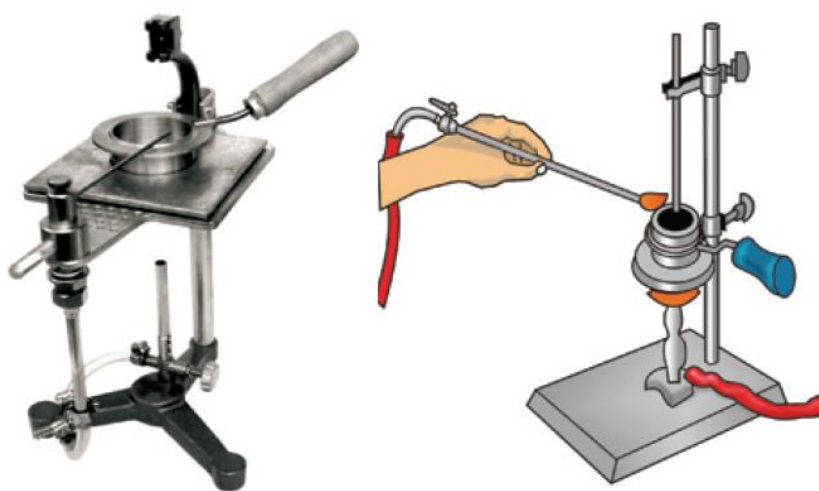


Fonte: BERNUCCI, et. al.,2006

2.14.3 Ponto de Fulgor (ASTM D 92 e NBR 11341)

O ponto de fulgor é utilizado para medir a possibilidade de a amostra produzir uma mistura inflamável com o ar, ou seja, é a indicação da temperatura-limite em que o CAP pode ser aquecido, sem risco de inflamar-se. (ABNT NBR 11341:2014, 2014).

Figura 10: Representação do ensaio de ponto de fulgor



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

2.14.4 Recuperação Elástica por Torção (DNIT 130/2010 - ME)

Como caracteriza o método de ensaio DNIT 130/2010 (2010), o ensaio tem por objetivo medir a possibilidade de retorno do material asfáltico. É realizado com cilindro de dimensões especificadas, imerso numa amostra do cimento asfáltico modificado. Mediante um dispositivo de torção, o cilindro é girado a 180° e se determina, depois de 30 minutos, o ângulo recuperado pelo cilindro através de uma torção.

Figura 11: Representação do equipamento de ensaio de recuperação elástica por torção



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

2.14.5 Viscosidade Rotacional *Brookfield* (ASTM D-4402 e NBR 15184)

Conforme ABNT NBR 15184:2004 (2004), este ensaio é utilizado para medir a viscosidade aparente do asfalto a altas temperaturas, medindo as propriedades de consistência relacionadas à temperatura de usinagem e compactação de forma a se assegurar condições adequadas de trabalho.

Figura 12: Representação do equipamento de ensaio de viscosidade *Brookfield*

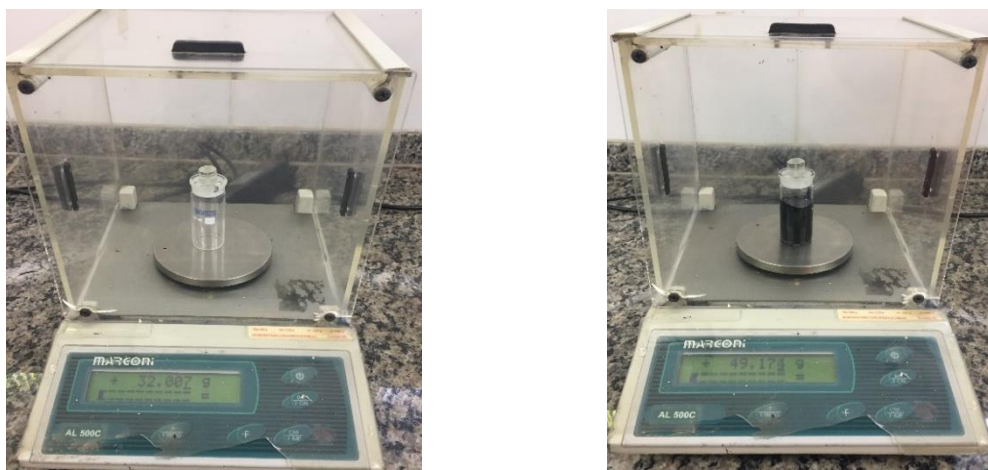


Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

2.14.6 Massa Específica do CAP (NBR 6296)

O ensaio de massa específica é realizado pelo método do picnômetro, relacionando volumes e massas, onde a densidade (massa específica) é calculada através de sua massa e da massa de água deslocada pela amostra. (ABNT NBR 6296:2012, 2012).

Figura 13: Representação do ensaio de massa específica do CAP



Fonte: Elaborado Autor, 2018

2.14.7 Envelhecimento pelo RTFOT (ASTM D-2872 e NBR 15235)

O envelhecimento do ligante asfáltico provoca a perda de suas características químicas e reológicas, durante o processo de manuseio, estocagem, usinagem da mistura e aplicação. Esse envelhecimento, ocasiona-se no aumento de sua consistência. (TONIAL, 2001).

De acordo com a ABNT NBR 15235:2009 (2009), a finalidade do equipamento é simular oxidação do ligante na usinagem, sendo estipulado um valor máximo de perda massa através da evaporação de voláteis, neste ensaio uma fina película de asfalto é girada em um vidro padronizado a 163°C por 85 minutos com injeção de ar.

Figura 14: Representação do ensaio de Envelhecimento do CAP



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Figura 15: Representação dos recipientes cobertos após o ensaio RTFOT



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Basicamente, os ensaios descritos acima são executados a fim de se verificar as características dos ligantes para critérios de aprovação em projetos de misturas. A figura 16 demonstra a especificação brasileira para o Cimento Asfáltico de Petróleo.

Figura 16: Especificação Brasileira de Cimento Asfáltico de Petróleo

Características	Unidade	Limites				Métodos	
		CAP 30-45	CAP 50-70	CAP 85-100	CAP 150-200	ABNT	ASTM
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	30 a 45	50 a 70	85 a 100	150 a 200	NBR 6576	D 5
Ponto de amolecimento, mín.	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D 36
Viscosidade Saybolt-Furol							
a 135°C, mín.	s	192	141	110	80	NBR 14950	E 102
a 150°C, mín.		90	50	43	36		
a 177°C		40 a 150	30 a 150	15 a 60	15 a 60		
Viscosidade Brookfield							
a 135°C, mín. SP 21, 20rpm, mín.	cP	374	274	214	155	NBR 15184	D 4402
a 150°C, mín.		203	112	97	81		
a 177°C, SP 21		76 a 285	57 a 285	28 a 114	28 a 114		
Índice de Suscetibilidade Térmica		(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	-	-
Ponto de fulgor, mín.	°C	235	235	235	235	NBR 11341	D 92
Solubilidade em tricloroetileno, mín.	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042
Dutilidade a 25°C, mín.	cm	60	60	100	100	NBR 6293	D 113
Efeito do calor e do ar a 163°C por 85 minutos							
Varição em massa, máx.	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5		D 2872
Dutilidade a 25°C, mín.	cm	10	20	50	50	NBR 6293	D 113
Aumento do ponto de amolecimento, máx.	°C	8	8	8	8	NBR 6560	D 36
Penetração retida, mín. (*)	%	60	55	55	50	NBR 6576	D 5

(*) Relação entre a penetração após o efeito do calor e o ar em estufa RTFOT e a penetração antes do ensaio.

Fonte: BERNUCCI et al., 2006

3 MATERIAIS, MÉTODOS E RESULTADOS

Neste item serão descritos quais foram os materiais utilizados, procedência e respectivos procedimentos normativos adotados para a realização do trabalho, levando em consideração a caracterização dos materiais e o tipo de dosagem.

3.1 Materiais

Para a realização deste trabalho, foram selecionados materiais que serão utilizados em obras de recapeamento na rodovia BR-101 no estado do Rio de Janeiro, sendo de extrema importância todos os ensaios que foram realizados, a fim de se garantir a integridade dos serviços a serem executados.

3.1.1 Agregados

Os agregados que serão utilizados na estrutura do pavimento asfáltico são provenientes da pedreira Itereré, localizada em Campos dos Goytacazes – RJ, sendo eles: brita 1, pedrisco e pó de pedra, que foram caracterizados a fim de se definir suas propriedades físicas e químicas como é demonstrado na tabela 2, para que se possa obter uma melhor mistura asfáltica.

Figura 17: Agregados utilizados no trabalho



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2018

3.1.2 Ligante asfáltico

Para este trabalho, utilizou-se o cimento asfáltico de petróleo – CAP 30-45, oriundo da refinaria REDUC, localizada em Duque de Caxias – RJ.

Figura 18: Ligante asfáltico utilizado no trabalho



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

3.2 Métodos utilizados

Realizou-se a caracterização dos agregados e do ligante asfáltico, de acordo com as respectivas normas. Os ensaios realizados estão descritos na tabela 1:

Tabela 1: Ensaios realizados

Ensaio	Material Ensaiado	Norma
Granulometria	Agregado	DNER-ME 083-98
Massa Específica	Agregado	DNER-ME 081-98
Absorção de água	Agregado	DNER-ME 081-98
Equivalente de Areia	Agregado	DNER-ME 054-97
Azul de Metileno	Agregado	AASHTO T-330
Abrasão "Los Angeles"	Agregado	DNER-ME 035-98
Índice de Forma	Agregado	DNER-ME 086-94
Massa Específica	Ligante asfáltico	ABNT NBR 6296-2012
Viscosidade Rotacional Brookfield	Ligante asfáltico	ABNT NBR 15184-2004

Ensaio	Material Ensaiado	Norma
Ponto de amolecimento	Ligante asfáltico	ABNT NBR 6560-2016
Penetração	Ligante asfáltico	ABNT NBR 6576-2007
Variação em massa	Ligante asfáltico	ABNT NBR 15235-2009
Envelhecimento pelo RTFOT	Ligante asfáltico	ABNT NBR 15235-2009
Dosagem Marshall	Mistura asfáltica	DNER-ME 043-95
Resistência à tração por compressão diametral	Mistura asfáltica	DNIT-ME 136-2010

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018.

3.2.1 Agregados

Realizou-se a caracterização completa dos agregados, determinando suas propriedades e os valores médios das granulometrias. Os resultados estão apresentados nas tabelas 2 e 3.

Tabela 2: Resultado das propriedades dos agregados

Ensaio	Unidade	Brita 1	Pedrisco	Pó de Pedra
Absorção de Água	%	0,4	0,6	0,2
Massa Específica Real Seca	g/cm ³	2,741	2,721	2,720
Massa Específica Aparente SSS	g/cm ³	2,713	2,675	2,709
Abrasão "Los Angeles"	%	36,3	-	-
Índice de forma	%	9,6	-	-
Equivalente de Areia	%	-	-	66,0
Azul de Metileno	mg/g	-	-	3,0

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

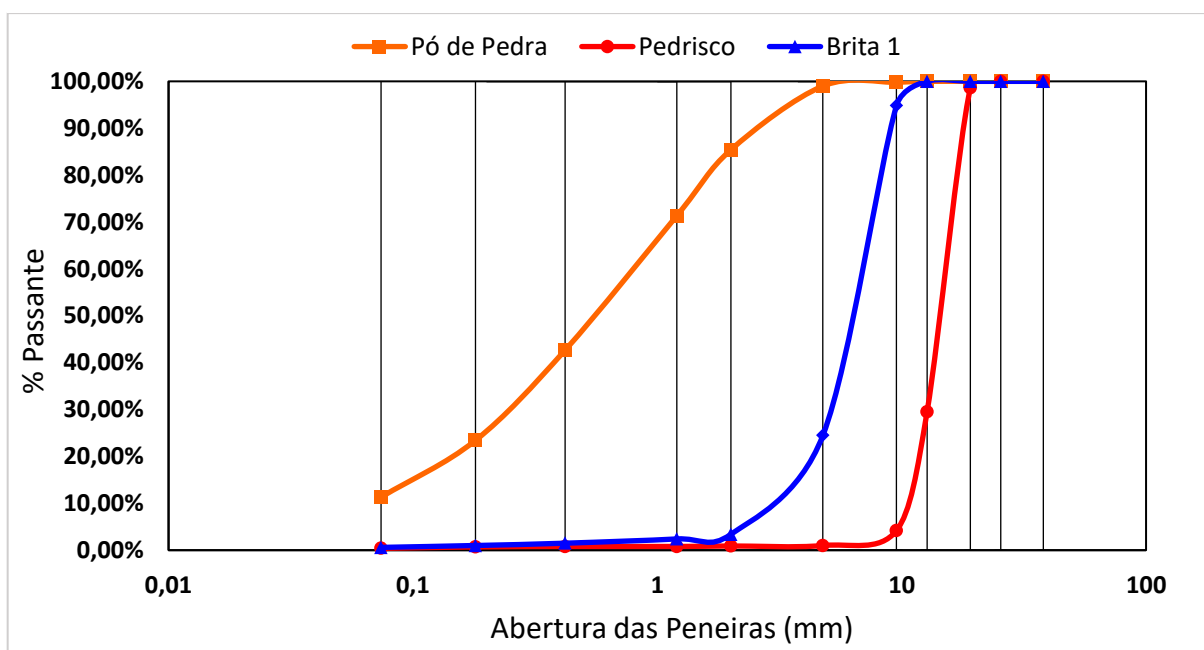
Tabela 3: Valores médios da análise granulométrica

Peneiras		Porcentagem Passante Encontrada		
(ASTM)	(mm)	Brita 1	Pedrisco	Pó de Pedra
1 1/2"	38,00	100,0	100,0	100,0
1"	25,40	100,0	100,0	100,0
3/4"	19,10	98,6	100,0	100,0
1/2"	12,70	29,5	100,0	100,0
3/8"	9,52	4,2	94,8	99,8
Nº 4	4,76	1,0	24,5	99,0
Nº 10	2,00	0,9	3,4	85,4
Nº 16	1,20	0,8	2,4	71,3

Peneiras		Porcentagem Passante Encontrada		
(ASTM)	(mm)	Brita 1	Pedrisco	Pó de Pedra
N° 40	0,42	0,8	1,5	42,7
N° 80	0,18	0,7	1,0	23,4
N° 200	0,074	0,4	0,6	11,3

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Gráfico 1: Curva granulométricas dos agregados utilizados



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

O ligante asfáltico foi ensaiado, antes e após o seu envelhecimento, a fim de se obter uma comparação de suas características, onde os resultados estão apresentados na tabela 4. Todos os procedimentos foram realizados de acordo com suas respectivas normas e métodos de ensaios.

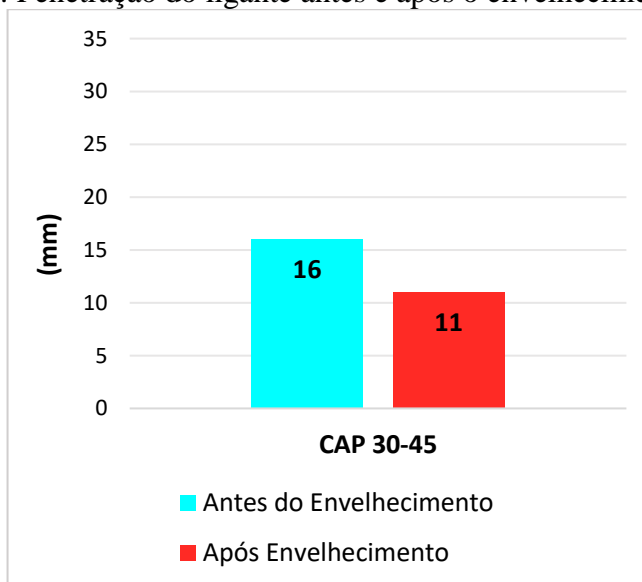
Tabela 4: Resultados da caracterização do ligante antes e após seu envelhecimento

Antes do Envelhecimento				
Ensaio	Unidade	Método	Resultado	Especificação
Massa Específica	g/cm ³	ABNT NBR 6296-2012	1,052	-
Viscosidade Rotacional Brookfield (135°C)	cP	ABNT NBR 15184-2004	630	Mínimo 374
Viscosidade Rotacional Brookfield (150°C)	cP	ABNT NBR 15184-2004	296	Mínimo 203

Antes do Envelhecimento				
Ensaio	Unidade	Método	Resultado	Especificação
Viscosidade Rotacional Brookfield (170°C)	cP	ABNT NBR 15184-2004	108	76 - 285
Ponto de amolecimento	°C	ABNT NBR 6560-2016	53	Mínimo 52
Penetração	0,1mm	ABNT NBR 6576-2007	16	30 - 45
Após envelhecimento em estufa RTFOT				
Viscosidade Rotacional Brookfield (135°C)	cP	ABNT NBR 15184-2004	810	Mínimo 374
Viscosidade Rotacional Brookfield (150°C)	cP	ABNT NBR 15184-2004	369	Mínimo 203
Viscosidade Rotacional Brookfield (170°C)	cP	ABNT NBR 15184-2004	128,5	76 - 285
Varição em massa	%	ABNT NBR 15235-2009	0,0	Máximo 0,5
Aumento do ponto de amolecimento	°C	ANP R19-2005	6	Máximo 8
Penetração retida	%	ANP R19-2005	72	Mínimo 60

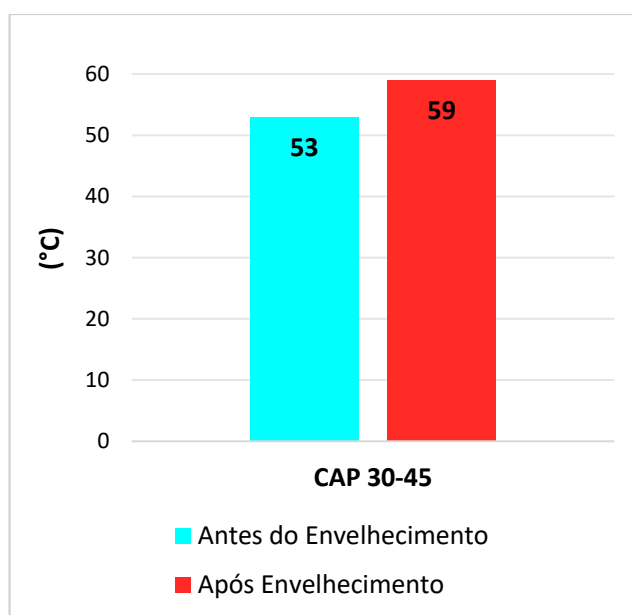
Fonte: Elaborada pelo Autor, 2018

Gráfico 2: Penetração do ligante antes e após o envelhecimento



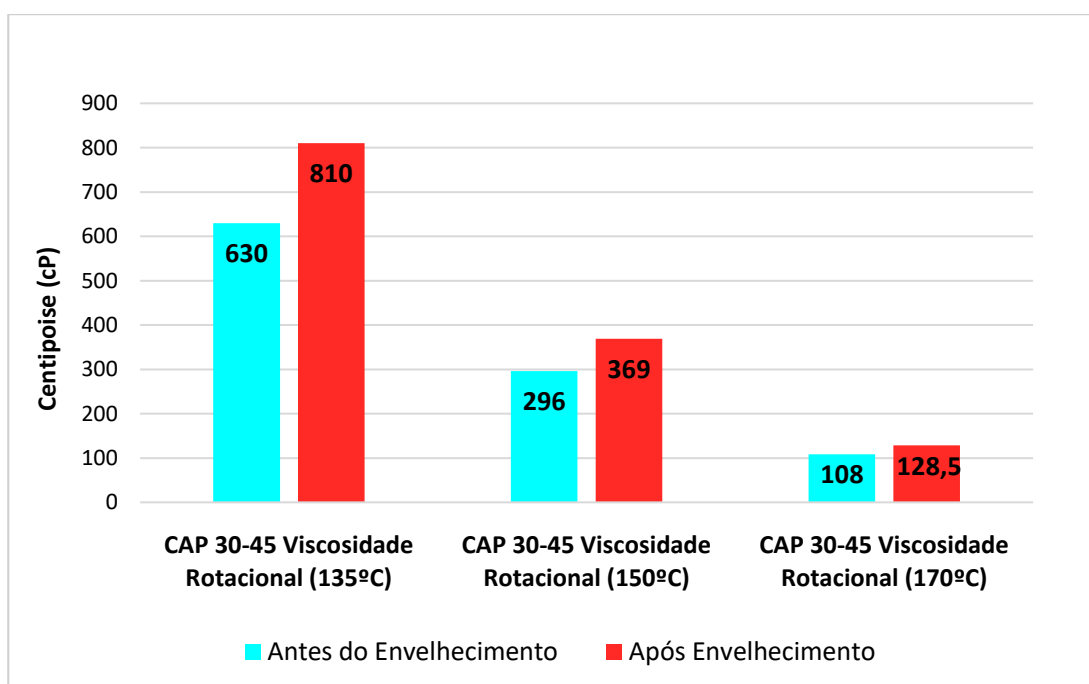
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Gráfico 3: Ponto de amolecimento do ligante antes e após o envelhecimento



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Gráfico 4: Viscosidade rotacional antes e após o envelhecimento



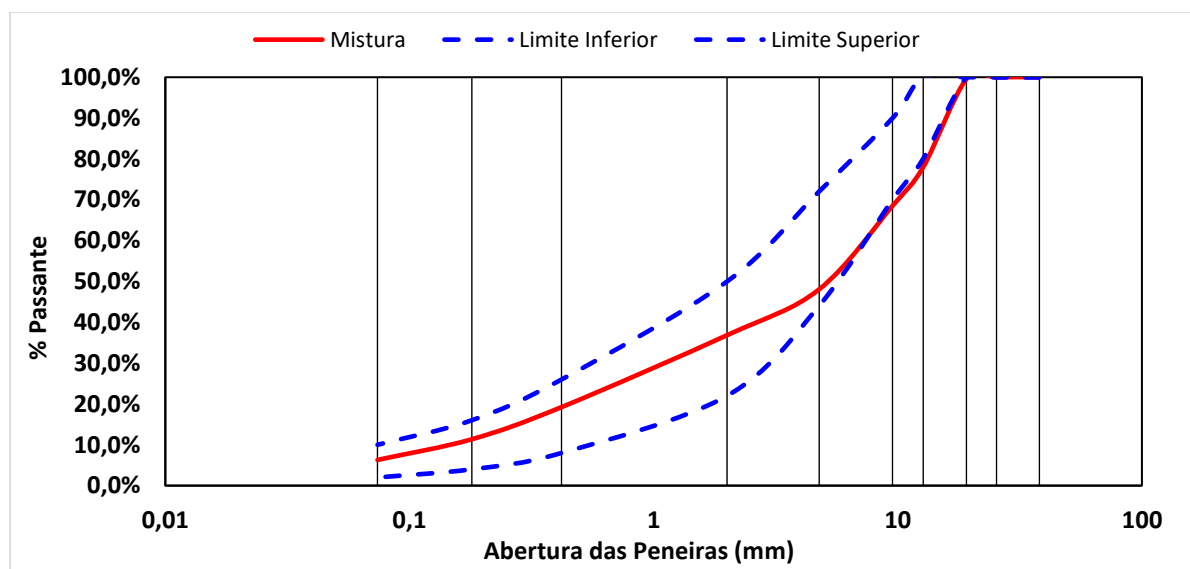
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

3.2.3 Dosagem da mistura asfáltica

Peneiras		Faixa C		Porcentagem Passante Encontrada				
(ASTM)	(mm)	Limite Inferior	Limite Superior	Brita 1	Pedrisco	Pó de Pedra	Cal CH I	Mistura Final Obtida
1"	25,40	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
3/4"	19,10	100,0	100,0	98,6	100,0	100,0	100,0	99,6
1/2"	12,70	80,0	100,0	29,5	100,0	100,0	100,0	77,9
3/8"	9,52	70,0	90,0	4,2	94,8	99,8	100,0	68,5
Nº 4	4,76	44,0	72,0	1,0	24,5	99,0	100,0	48,0
Nº 10	2,00	22,0	50,0	0,9	3,4	85,4	100,0	36,8
Nº 40	0,42	8,0	26,0	0,8	1,5	42,7	100,0	19,2
Nº 80	0,18	4,0	16,0	0,7	1,0	23,4	99,5	11,3
Nº 200	0,074	2,0	10,0	0,4	0,6	11,3	97,6	6,3
% de Agregado				31,3	27,2	40,0	1,5	100,0

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2018

Gráfico 5: Curva granulométrica da mistura



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2018

3.2.4 Envelhecimento do ligante asfáltico

O envelhecimento do ligante asfáltico pode ser o processo de endurecimento que ele sofre durante a usinagem, estocagem, aplicação, entre outros, sendo responsável pela alteração das características físicas, químicas e reológicas que causam aumento da consistência.

Estabeleceu-se então, para o trabalho, que se realizasse três corpos-de-prova com ligante envelhecido. O método de envelhecimento utilizado foi o *Rolling Thin Film Oven Test* – RTFOT, seguindo as especificações e parâmetros da ABNT NBR 15235/2009.

O processo foi realizado por duas vezes, para garantir que a quantidade de ligante envelhecido fosse necessária para a realização dos três corpos-de-prova e rice, bem como todos os ensaios de caracterização que são realizados após o envelhecimento.

Figura 19: RTFOT - Esquema do ensaio.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

- (A) Recipiente de vidro onde é inserida a amostra;
- (B) Amostra sendo inserida no recipiente;
- (C) Pesa-se 35g de amostra para realizar o ensaio;
- (D) As amostras ficam em repouso durante uma hora antes de ser colocada no RTFOT;
- (E) Prateleira vertical rotativa já com as amostras após o repouso;
- (F) RTFOT programado para iniciar o ensaio com temperatura de 163°C;
- (G) Ligante já envelhecido (após 85 minutos na estufa) sendo removido do recipiente para a realização dos ensaios posteriores;

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO

No estudo foram analisadas duas misturas através de ensaios laboratoriais e os resultados obtidos estão apresentados neste trabalho, que tem por finalidade avaliar o comportamento de uma mistura asfáltica quando se utiliza ligantes envelhecidos na dosagem do concreto asfáltico em comparação com uma mistura sem que o ligante sofra o envelhecimento, assim pode-se avaliar quais as diferenças em termos de propriedades físicas da mistura propriamente dita, o que pode ser prejudicial ou não a estrutura.

Em primeiro ponto, avaliou-se a Densidade Máxima Teórica – DMT (onde não se considera o ar na mistura) e a Densidade aparente ou Massa Específica Aparente – MEA (onde considera-se o ar). Com esses dois dados foi possível calcular o número de vazios da mistura, ou seja, onde consegue-se uma estrutura de pavimento asfáltico estável e confortável aos usuários. Usualmente o número de vazios na dosagem da mistura asfáltica varia entre 3% a 4%, e os resultados obtidos nos ensaios feitos com o ligante natural e pós envelhecimento ficaram dentro deste limite.

A tabela 7 demonstra as densidades da mistura, e a tabela 8 a média do número de vazios para o ligante asfáltico em seu estado natural.

Tabela 7: Densidade máxima teórica e densidade aparente utilizando CAP no estado natural

Densidade Máxima Teórica (RICE)		Pesagem dos CP's			
			CP-1	CP-2	CP-3
Peso da amostra (g)	2078,1	Peso ao ar (g)	1154,1	1198,7	1155,5
Peso do frasco + água(g)	7963,4	Peso SSS (g)	1154,4	1199,9	1156,8
Peso do frasco + amostra + água (g)	9225,8	Peso Imerso (g)	687,1	711,4	687,0
		Espessura (cm)	5,87	6,09	5,92
Densidade máxima teórica (g/cm ³)	2,547	Vazios (%)	3,1	3,7	3,5
		Densidade Aparente (g/cm ³)	2,649	2,453	2,459

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Tabela 8: Análise estatística dos dados

Análise Estatística	
Média	3,4
Variância	0,093
Desvio Padrão	0,306
Coefficiente de variação	9,0%

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

A tabela 9 demonstra as densidades da mistura, e a tabela 10 a média do número de vazios para o ligante asfáltico envelhecido.

Tabela 9: Densidade máxima teórica e densidade aparente utilizando CAP envelhecido

Densidade Máxima Teórica (RICE)		Pesagem dos CP's			
			CP-1	CP-2	CP-3
Peso da amostra (g)	2083,5	Peso ao ar (g)	1197,7	1196,4	1203,3
Peso do frasco + água(g)	7963,4	Peso SSS (g)	1199,2	1197,1	1203,8
Peso do frasco + amostra + água (g)	9228,3	Peso Imerso (g)	710,1	707,8	715,2
		Espessura (cm)	6,16	6,12	6,13
Densidade máxima teórica (g/cm ³)	2,545	Vazios (%)	3,8	3,9	3,3
		Densidade Aparente (g/cm ³)	2,448	2,445	2,462

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Tabela 10: Análise estatística dos dados

Análise Estatística	
Média	3,7
Variância	0,103
Desvio Padrão	0,321
Coefficiente de variação	8,8%

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Em segundo ponto, avaliou-se a resistência a tração da mistura, assim, foram rompidos os corpos de prova que foram utilizados primeiramente para se avaliar a densidade. O ensaio consiste no rompimento do corpo de prova por compressão diametral, tendo então um valor de resistência à tração indireta, o esquema de ensaio é demonstrado na figura 20, conforme abaixo:

Figura 20: Esquema para rompimento por compressão diametral



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

O ensaio é parado quando o corpo de prova se rompe por completo, como é demonstrado na figura 21, que é acompanhado por um programa de computador onde tem-se a distribuição da tensão e a propagação da força tendo-se assim um gráfico em parábola como se pode ver no gráfico 6.

Figura 21: Rompimento do corpo de prova por compressão diametral



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Para a realização do ensaio, utilizou-se na norma DNER-ME – 138/94, que prescreve os procedimentos e cálculos a serem empregados no estudo, para se determinar a resistência à tração de corpos de prova cilíndricos de misturas betuminosas.

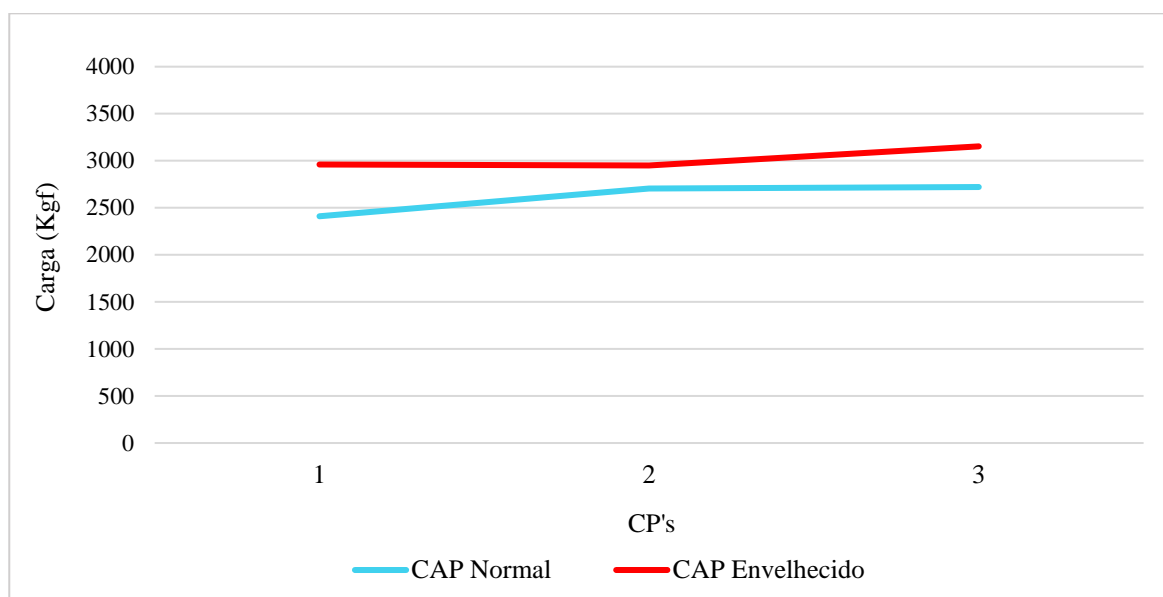
A tabela 11 a seguir demonstra as cargas máximas aplicadas nos corpos de prova após rompimento. Nota-se um aumento de resistência do ligante envelhecido em relação ao ligante normal, como mostra o gráfico 6.

Tabela 11: Tabela de Cargas

CP	CAP Normal	CAP Envelhecido
	Carga Aplicada (Kgf)	Carga Aplicada (Kgf)
1	2410	2959
2	2704	2950
3	2721	3153

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Gráfico 6: Representação da propagação da força no rompimento do corpo de prova entre o CAP normal X CAP envelhecido



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Para o cálculo da resistência à tração por compressão diametral é utilizado a equação a seguir, retirada da norma DNER-ME-136/10.

$$\sigma_R = \frac{2F}{100 * \pi * D * H}$$

Onde:

σ_R = Resistência à tração em MPa;

F = Carga de ruptura em N;

D = Diâmetro do corpo de prova em cm;

H = Altura do corpo de prova em cm;

As tabelas 12 e 13 demonstram a resistência à tração dos corpos de prova com CAP normal e CAP envelhecido, pode-se concluir que houve um pequeno aumento na resistência à tração com o CAP envelhecido.

Tabela 12: Resistência à tração da mistura com CAP normal

CP	CAP Normal				
	Carga Aplicada (Kgf)	Força (N)	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Resistencia à Tração (Mpa)
1	2410	23642,1	10	6,35	2,37
2	2704	26526,24	9,9	6,35	2,69
3	2721	26693,01	9,97	6,35	2,68

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Tabela 13: Resistência à tração da mistura com CAP envelhecido

CP	CAP Envelhecido				
	Carga Aplicada (Kgf)	Força (N)	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Resistencia à Tração (Mpa)
1	2959	29027,79	10	6,35	2,91
2	2850	27958,5	9,9	6,35	2,83
3	3153	30930,93	9,97	6,35	3,11

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Analisando os dois ensaios em conjunto, nota-se que com o envelhecimento do ligante asfáltico simulado pelo ensaio RTFOT não se tem uma diferença considerável de resultados. Porém, com relação a resistência à tração, o envelhecimento causou um pequeno aumento de rigidez na mistura.

5 CONCLUSÃO

Tendo como objetivo a análise de duas misturas a quente, onde utilizou-se dados de um projeto conhecido e já definido, fornecido para a realização do trabalho, buscou-se então obter parâmetros e conhecimentos sobre o comportamento do ligante natural na mistura em relação ao ligante envelhecido através de ensaios laboratoriais.

Com base nos estudos realizados, pode-se concluir que as duas misturas apresentaram resultados homogêneos, sem discrepância, mesmo sendo utilizado na mistura o CAP envelhecido. Como a simulação do envelhecimento pela RTFOT é uma simulação à curto prazo, nos ensaios básicos laboratoriais, onde o mais importante são as densidades e volume de vazios da mistura, não se obteve variações que pudessem ser consideráveis.

No ensaio de resistência à tração obteve-se um aumento na rigidez da mistura, o que aparentemente pode ser bom, mas, o pavimento asfáltico deve ter como sua propriedade principal a viscoelasticidade, ou seja, quando aplicado uma carga no mesmo, ele deforma e tende a voltar ao seu lugar inicial, com o aumento da rigidez, o pavimento asfáltico perde esta propriedade e com as solicitações do tráfego, microfissuras vão aparecendo na camada, que no final fazem a estrutura entrar em colapso.

Para uma melhor verificação do comportamento do ligante asfáltico com o passar do tempo, estudos de campo devem ser realizados em conjunto com os estudos laboratoriais. Deve-se construir pistas testes, ou trechos experimentais e fazer o acompanhamento de como a estrutura e a camada de pavimento asfáltico está se comportando com as solicitações do tráfego.

Pode-se concluir que os ensaios laboratoriais são de extrema importância na confecção de pavimentos, pois um pavimento com uma vida útil longa, sendo confortável e proporcionando segurança ao usuário, dependem de ensaios que controlam a qualidade do mesmo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS -ANP. **Resolução N°19**. 11 de julho de 2005.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS – ASSHTO. **T 330: The qualitative detection of harmful clays of the smectite group in aggregates using methylene blue**. USA, 2007.

ASPHALT, Institute. **The Asphalt Handbook**. USA,2007. Rev. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11341: Derivados de petróleo – Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15184: Materiais betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15235: Materiais asfálticos – Determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6296: Produtos betuminosos semissólidos – Determinação da massa específica e densidade relativa**. Rio de Janeiro, 2012.

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

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

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, Liedi Bariani, et. al. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobras Abeda, 2006.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Divisão de Capacitação Tecnológica. **Manual de pavimentação** – 2ed. – Rio de Janeiro, 1996. 320p. (IPR. Publ., 697).

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de pavimentação**. 3ed. – Rio de Janeiro, 2006. 274p. (IPR. Publ., 719).

CNT, SEST, SENAT. **Pesquisa CNT de Rodovias 2017: Relatório Gerencial**. Brasília, 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ES 299/97: Especificação de serviço. Pavimentação – regularização do subleito**. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 035/98: Método de ensaio. Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”**. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 043/95: Método de ensaio. Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall**. Rio de Janeiro, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 054/97: Método de ensaio. Equivalente de areia**. Rio de Janeiro, 1997.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 083/98: Método de ensaio. Agregados – análise granulométrica.** Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 086/94: Método de ensaio. Agregados – determinação do índice de forma.** Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ES 138/10: Especificação de serviço. Pavimentação – reforço do subleito.** Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ES 136/10: Especificação de Serviço. Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico.** Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ME 130/10: Método de Ensaio. Determinação da recuperação elástica de materiais asfálticos pelo ductilômetro.** Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ME 136/10: Método de Ensaio. Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral.** Rio de Janeiro, 2010.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, ECS. **En 12597: Bitumen and bituminous binders terminology.** Bruxelas, European Committee for standardization, 2000.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO – IBP. **Informações básicas sobre materiais asfálticos.** Rio de Janeiro: IBP – Comissão de Asfalto, 1999.

SENÇO, Wlastermiller de. **Manual de técnicas de pavimentação.** São Paulo: Pini, vol.1. 2.ed, 2007.

SENÇO, Wlastermiler de. **Manual de técnicas de pavimentação**. São Paulo: Pini, vol.2. 1.ed, 2001.

TONIAL, Ilonir Antonio. **Influência do envelhecimento do revestimento asfáltico na vida de fadiga de pavimentos**. Rio de Janeiro, 2001. 248p. Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.