



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL  
ÁREA GEOTÉCNICA

FLÁVIA DO SOCORRO DE SOUSA CARVALHO

**ANÁLISE DOS PARÂMETROS MECÂNICOS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS  
COM ADIÇÃO DE ÓXIDOS METÁLICOS**

CAMPINA GRANDE-PB  
2018

FLÁVIA DO SOCORRO DE SOUSA CARVALHO

**ANÁLISE DOS PARÂMETROS MECÂNICOS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS COM  
ADIÇÃO DE ÓXIDOS METÁLICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a  
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG,  
para encerramento do componente curricular e  
conclusão da graduação em Engenharia Civil.

Área de concentração: Pavimentação  
Orientador: Prof. Dsc. Adriano Elísio de Figueiredo  
Lopes Lucena  
Coorientadora: MSc Thalita Maria Ramos Porto

Campina Grande-PB  
2018

*Este trabalho é dedicado à Deus, à minha família e  
meus amigos que sempre estiveram presentes.*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por todas as coisas boas que Ele tem me proporcionado, pela minha saúde e pelas oportunidades que Ele me deu. Agradeço meus pais Pedro Manoel de Carvalho e Maria Glemilde de Sousa, por serem os melhores pais que um filho pode ter. Por sempre terem lutado incansavelmente para me proporcionar tudo do melhor, educação, saúde, amor, estiveram juntos comigo em minha trajetória de estudos, em cada batalha que enfrentei e em todas as minhas conquistas, a todo momento, com muita fé, torcida e carinho. Hoje devo tudo que sou e que conquistei a eles.

Agradeço aos meus irmãos Glaucia e Valentim, pela amizade, companheirismo e pela força que sempre me deram para continuar caminhando.

A minha madrinha Laidnns (Inha), muito obrigado pelo amor e por todas as coisas que já fez e faz por mim, serei eternamente agradecida como também aos seus pais, Ida e Tatá, seus irmãos Bara e Del estarão sempre no meu coração.

As minhas tias e aos meus tios. Em especial a tia Ana, Santa, Nenzinha, Da Paz e Raimunda não poderia deixar de agradecer-las por esse amor que tem por mim.

Agradeço a todos os meus educadores desde a minha escola Padre Cícero localizada no interior do Piauí, aos professores do colégio São Lucas e aos mestres da UFCG, especialmente aos professores do curso de Engenharia Civil.

Agradeço aos amigos que fiz em Campina Grande, em especial Camila Farias, Ana Cristina, Carlos Vinicius, Osires Neto, Pedro Matheus, Lucas Rafael, Werley Targino, Anna Karolina, Virgínia Almeida, Matheus Abrantes, Jessyka Cunha obrigada por tornar essa caminhada menos cansativa.

A todos os meus amigos que conquistei ao longo da vida, em especial a Lúcia Marina, Bruna Hipólito, Cláudia V., Vanessa, A. Beatriz, Laissa Kelly, Kelly, Tatiana T., Débora L., Ana Zaira, Ana Karla, amo vocês.

Ao meu namorado Paulo Vinicius por toda a sua ajuda, paciência e amor dedicado.

Agradeço aos técnicos do laboratório, Jadilson, Nildinho, e aos amigos Christian (“Alemão”), Daniel, César, Tássila Porto.

Agradeço ao professor Adriano Lucena e a sua aluna Thalita Porto por toda ajuda oferecida durante o desenvolvimento deste trabalho.

Muito obrigada!

*"Dar menos do que o seu melhor é sacrificar o dom."  
(Steve Prefontaine)*

## RESUMO

O pavimento asfáltico convencional, devido a sua coloração escura absorve uma grande quantidade de energia que é transformada em calor, promovendo um enorme desconforto térmico para as pessoas que vivem nesse ambiente. Esse estudo trata da adição de pigmentos vermelhos na mistura asfáltica para obtenção de misturas asfálticas coloridas. A adição de óxidos metálicos em misturas asfálticas surge como uma forma de diminuir o albedo e conseqüentemente minimizar os efeitos da ilha de calor urbana, além da vantagem da diminuição da temperatura de trabalho do pavimento é esperado que não ocorra diminuição dos parâmetros mecânicos a fim de comprometer sua estrutura. Para realização desse estudo o ligante asfáltico utilizado na pesquisa foi submetido a ensaios de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade rotacional e os agregados caracterizados com os ensaios de massa específica, granulometria e abrasão Los Angeles. Foi utilizada a dosagem Marshall, para produção dos corpos de prova a serem ensaiados para quantificação dos ensaios mecânicos: Resistência a Tração, Módulo de Resiliência e Estabilidade Marshall. A mistura com adição de 5% de óxido metálico apresentou resultados de resistência inferiores a mistura de referência fabricada sem a adição de corante. No entanto, a mistura asfáltica com corante atende aos requisitos mínimos exigidos por norma para todos os ensaios realizados, podendo ser utilizada em pavimentos coloridos com a finalidade de diminuir o efeito de ilha de calor urbana.

**Palavras chave:** Corante, Dosagem Marshall, resistência da mistura.

## ABSTRACT

The Conventional asphalt pavement, due to its dark coloring, absorbs a big quantity of energy which is transformed into heat, promoting a significant thermal discomfort for the people who live in this environment. This study deals with the addition of red pigments in the asphalt mixture to obtain colorful asphalt mixtures. The addition of metal oxides in asphalt mixtures emerges as a means of reducing the albedo and, consequently, minimizing the effects of the urban heat island, besides the advantage of the reduction in the operating temperature of the pavement, it is expected not to occur the decrease of the mechanical parameters to compromise the pavement structure. For this study, the asphalt binder was submitted to penetration, softening point and rotational viscosity tests and the aggregates characterized with the specific gravity, granulometry and abrasion tests Los Angeles. The Marshall dosage was used to produce the test specimens to be tested for quantification of the mechanical tests: Tensile Strength, Resilient Modulus and Marshall Stability. The mixture with 5% of metal oxide showed lower strength results than the reference mixture fabricated without dye addition. However, the asphalt mixture with dye meets the minimum requirements set by standard for all tests performed and may be used on colorful pavements to reduce the effect of urban heat island.

**Key-words:** Colorant, Marshall dosage, strength of the blend.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos ligantes asfálticos segundo o DNIT.....	21
Figura 2 – Fíler: a) Cimento Portland; b) Cal Hidratada .....	22
Figura 3 – Polímeros: (a) SBS; (b) EVA.....	25
Figura 4 – Óleos: (a) Mamona; (b) Girassol.....	26
Figura 5 – Ceras naturais: (a) Cera de abelha; (b) Cera de carnaúba .....	27
Figura 6– Ilha de Calor Urbana .....	27
Figura 7 – Efeito do albedo na superfície .....	28
Figura 8 – Perfil geral da ilha de calor urbana.....	29
Figura 9 – Taxa de albedo para diferentes tipos de superfícies .....	30
Figura 10 – Pigmento Vermelho A .....	35
Figura 11 – Agregados graúdos: (a) Brita 19mm; (b) Brita 12,5mm .....	36
Figura 12 – Agregado miúdo: Areia.....	36
Figura 13 – Fíler: (a) Cal hidratada; (b) Pó de pedra.....	37
Figura 14 – Ligante asfáltico utilizado na pesquisa .....	37
Figura 15 – Fluxograma da caracterização experimental realizada.....	38
Figura 16 – Fluxograma da caracterização mecânica das misturas asfálticas .....	38
Figura 17 – Curva granulométrica dos agregados graúdos e miúdos .....	39
Figura 18 – Brita 19mm e brita 12,5mm imersas em água para realização do ensaio de massa específica .....	40
Figura 19 – Ensaio de massa específica do agregado miúdo.....	41
Figura 20 – Curva de Fuller.....	44
Figura 21– Teor de asfalto x Vv x RBV.....	45
Figura 22 – Mistura asfáltica colorida (corpo de prova) .....	46
Figura 23 – Prensa para realização do ensaio Estabilidade Marshall .....	47
Figura 24 – Ensaio de Resistência a Tração .....	48
Figura 25 – Ensaio de Módulo de Resiliência.....	49
Figura 26 – Resistência a Tração.....	50
Figura 27 – Módulo de resiliência das misturas estudadas.....	52
Figura 28 – Estabilidade Marshall.....	54

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Ensaio para caracterização dos agregados .....	20
Quadro 2 – Características físicas e químicas dos pigmentos estudados .....	32

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Massa específica real e aparente dos agregados graúdos e miúdo .....	41
Tabela 2 – Resultado do ensaio de abrasão Los Angeles.....	42
Tabela 3 – Resumo da caracterização do ligante .....	43
Tabela 4 – Temperatura de usinagem e compactação.....	44
Tabela 5 – Requisitos da dosagem de concreto asfáltico DNIT-ES 031/2004.....	45
Tabela 6 – Resistência a tração das misturas asfálticas .....	50
Tabela 7 – Resistência a tração das misturas asfálticas .....	51
Tabela 8 – Estabilidade Marshall.....	53

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira De Normas Técnicas
CAN	Cimento Asfáltico Natural
CAP	Cimento Asfáltico De Petróleo
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado A Quente
CNT	Confederação Nacional Do Transporte
DNIT	Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes
EVA	Polietileno-Vinil-Acetato
IC	Ilha De Calor
ICU	Ilha De Calor Urbana
LEP	Laboratório De Engenharia De Pavimentos
MD	Módulo De Resiliência
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
OMM	Óxidos Metálicos Mistos
PMF	Pré-Misturado A Frio
PMQ	Pré-Misturado A Quente
RBV	Relação Betume/Vazios
RT	Resistência A Tração Por Compressão Diametral
SBS	Estireno-Butadieno-Estireno
SBR	Estireno-Butadieno-Rubber
UFMG	Universidade Federal De Campina Grande
Vv	Volume De Vazios

## SUMÁRIO

<b>1.INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1 OBJETIVOS .....	17
1.1.1 Objetivo Geral: .....	17
1.1.2 Objetivos Específicos: .....	17
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>18</b>
2.1 MISTURAS ASFÁLTICAS .....	18
2.1.1 Misturas Asfálticas Convencionais.....	19
2.1.2 Deformação Permanente.....	22
2.1.3 Fadiga .....	23
2.2 MISTURAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS .....	23
2.2.1 Polímeros .....	24
2.2.2 Óleos .....	25
2.2.3 Ceras .....	26
2.3 ILHA DE CALOR URBANO .....	27
2.4 ALBEDO .....	28
2.5 MISTURAS ASFÁLTICAS COLORIDAS .....	29
2.5.1 Finalidade Das Misturas Asfálticas Coloridas.....	31
2.5.2 Tipos de Misturas Asfálticas Coloridas .....	31
2.5.3 Fabricação de Misturas Asfálticas Coloridas.....	32
2.5.4 Deformação Permanente em Misturas Asfálticas Coloridas .....	33
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>35</b>
3.1 MATERIAIS .....	35
3.1.1 Óxido Metálico .....	35
3.1.1 Agregados Graúdos .....	35
3.1.2 Agregado Miúdo .....	36
3.1.1 Fíler .....	36
3.1.2 Cimento asfáltico de petróleo (CAP).....	37
3.2 PROPRIEDADES FÍSICAS DO AGREGADO .....	39
3.2.1 Distribuição granulométrica dos grãos .....	39
3.2.2 Massa Específica .....	39
3.2.3 Determinação da abrasão “Los Angeles” .....	41
3.3 CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO.....	42
3.3.1 Ponto de amolecimento.....	42

3.3.2 Penetração.....	42
3.3.3 Viscosidade Rotacional-Viscosímetro Brookfield .....	43
3.4 DOSAGEM MARSHALL .....	44
3.5 ENSAIOS MECÂNICOS .....	46
3.5.1 Estabilidade Marshall .....	46
3.2.1 Resistência à tração por compressão diametral (RT) .....	47
3.2.2 Módulo de resiliência (MR).....	48
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>50</b>
4.1 RESISTÊNCIA Á TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (RT).....	50
4.2 MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	51
4.3 ESTABILIDADE MARSHALL .....	53
<b>4 CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....</b>	<b>55</b>
4.1 CONCLUSÕES .....	55
4.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS .....	55
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>56</b>

## 1. INTRODUÇÃO

No Brasil, até 2016 apenas 12,3% da malha ferroviária encontrava-se pavimentada, segundo a CNT (Confederação Nacional do Transporte). Tendo em vista uma possível retomada do crescimento econômico do país essa situação requer maiores investimentos futuramente nos serviços de infraestrutura e transportes, tornando-se imprescindível a ampliação e restauração da malha rodoviária existente, já que esse é o meio mais largamente utilizado para transportar pessoas e grande parte da produção nacional.

O revestimento do pavimento asfáltico é a camada que fica em contato com o tráfego e é responsável por receber e transmitir os esforços aplicados sobre ela. Submetida principalmente a esforços de compressão e tração na flexão essa camada deverá ser dimensionada para o tráfego previsto no período de projeto e para as condições climáticas as quais ficará submetido. As cargas que atuam na estrutura, quando bem projetada e corretamente executada, não devem produzir deformações excessivas nem deslocamentos que causem ruptura. O pavimento é dimensionado objetivando não gerar danos estruturais como a deformação permanente e a fadiga. Para evitar tais efeitos deve-se conhecer as propriedades dos materiais que o compõe. (BERNUCCI et al.,2008).

Segundo o DNIT 031/2004-ES os pavimentos asfálticos são obtidos a partir da mistura de agregado graúdo, agregado miúdo, material betuminoso e fíler. Podendo ser eles: convencionas, modificados com polímeros ou misturas asfálticas coloridas. Os ditos convencionais são obtidos pela mistura dos agregados miúdos e graúdos, pó de pedra, fíler e cimento asfáltico de petróleo; os modificados são obtidos adicionando-se materiais como polímeros, óleos e ceras. Já os asfaltos coloridos são obtidos mediante a adição de uma porcentagem de óxidos de ferro a mistura.

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. Nesse contexto, surgem pesquisas que visam adicionar diferentes materiais nas misturas asfálticas com o objetivo de torná-las mais resistentes. Villena (2014) adicionou óxidos de metais mistos em pavimentos asfálticos com o objetivo de diminuir a temperatura dos mesmos, uma vez que pavimentos asfálticos possuem a superfície escura que não refletem bem a luz solar, ou seja, possuem uma baixa taxa de albedo gerando um desconforto térmico e contribuindo para o aumento da Ilha de Calor (IC).

Segundo Villena (2014) a adição de pigmentos afeta os parâmetros mecânicos e de

desempenho das misturas asfálticas coloridas. Para esse estudo será analisado a adição de óxidos metálicos de ferro nas misturas asfálticas com o objetivo de analisar os parâmetros mecânicos do revestimento asfáltico.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral:

Este estudo tem como objetivo principal avaliar a adição dos óxidos metálicos na resistência mecânica das misturas asfálticas.

### 1.1.2 Objetivos Específicos:

- Realizar ensaios de caracterização dos materiais que serão utilizados nas misturas asfálticas;
- Realizar a dosagem de misturas asfálticas, do tipo dosagem Marshall, adicionando pigmento de óxidos metálicos mistos de coloração vermelha, com objetivo de avaliar a influência do pigmento nos parâmetros de compactação das amostras;
- Obter parâmetros mecânicos e comparar com os parâmetros das misturas convencionais.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 MISTURAS ASFÁLTICAS

Constituem a camada de revestimento do pavimento, o qual é formado por estruturas de múltiplas camadas, sendo esta a responsável por receber diretamente a carga dos veículos e mais intensamente a ação climática. As misturas asfálticas são obtidas através de misturas em usina, a quente ou a frio, envolvendo agregados e ligantes asfálticos, adequadamente proporcionados (BERNUCCI *et. al*, 2008).

Promovem características funcionais ao pavimento, como segurança (aderência, drenagem e homogeneidade), conforto (regularidade longitudinal e transversal, redução de ruídos e estética) além de proteção a estrutura (impermeabilidade, resistência mecânica ao cisalhamento, desgaste, ação da água e variações da temperatura). Logo em proporções adequadas a mistura de ligantes asfálticos com agregados irá garantir tais propriedades ao pavimento. (JUNIOR, 2018).

Sua constituição na maioria das vezes possui agregados minerais de diferentes tamanhos, podendo variar quanto à fonte de extração, misturados com ligantes asfálticos, que quando dosados adequadamente supra as necessidades de impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à derrapagem, resistência à fadiga e ao trincamento térmico, de acordo com o clima e o tráfego do local. Esse material pode ser fabricado em uma usina específica (misturas usinadas), fixa ou móvel, ou preparado na própria pista (tratamentos superficiais). De acordo com o processo de fabricação, a preparação da mistura pode receber a seguinte nomenclatura (CARDOSO, 2004):

- Concreto asfáltico (concreto betuminoso usinado a quente - CBUQ): É fabricado em usina, formado pela união de agregados graúdos, agregados miúdos, material de enchimento, cimento asfáltico, que serão compactados de forma reduzir ao máximo o índice de vazios. Dentre as misturas é a mais nobre, com maior resistência e rigidez;
- Pré-misturado a quente (PMQ): Produzido na usina, também é um concreto asfáltico, porém com diferenças na granulometria do agregado e índice de vazios do CBUQ;
- Pré-misturado a frio (PMF): É uma mistura fabricada em usina composta de agregado e asfalto diluído ou emulsão asfáltica, com alta resistência e rigidez reduzida

## 2.1.1 Misturas Asfálticas Convencionais

As misturas asfálticas convencionais são compostas por agregados, ligante asfáltico e fíler. Esses materiais separadamente possuem propriedades físicas que devem ser previamente caracterizadas para que haja uma perfeita união das partículas de cada um dos materiais formando uma mistura que apresente boas propriedades mecânicas para o uso a qual será destinada.

### 2.1.1.1 Agregados

São materiais sem forma e volume definidos, geralmente inertes que são selecionados por suas propriedades serem adequadas para a produção de misturas asfálticas. Na pavimentação eles podem ser classificados quanto a sua natureza, tamanho dos grãos e quanto mineralogia (PINTO, 2006)

Segundo Pinto (2006) “Todos os solos originam-se da decomposição das rochas que constituíam inicialmente a crosta terrestre”, logo sua natureza vai depender do conjunto de processos químicos e físicos aos quais os minerais que constituem esse solo são submetidos ao longo do seu processo de formação. Quanto aos tamanhos dos grãos existem diversas classificações para o solo, sendo o conjunto silte e argila denominado fração fina do solo, enquanto que o conjunto areia e pedregulho é denominado fração grossa do solo. Quanto a mineralogia as partículas do solo vão ter a mesma composição da rocha matriz, normalmente formadas pela união de diversos materiais onde um geralmente está presente em maior quantidade em cada tipo de solo, a exemplo do quartzo, mineral comumente encontrado em siltes e areias, já os feldspatos dão origem aos argilominerais.

Os diferentes tamanhos das suas partículas dos solos fazem com que eles possam ser utilizados tanto nas misturas tradicionais densas como em misturas inovadoras de alto desempenho. Para caracterização desses solos, que são usados como agregados nas misturas asfálticas são feitos ensaios como os expostos no Quadro 1.

Quadro 1 – Ensaios para caracterização dos agregados

<b>Ensaio</b>	<b>Norma</b>
Granulometria	DNIT-ME 083/94
Forma e Textura	DNIT-ME 086/94
Abrasão “Los Angeles”	DNIT-ME 035/94
Sanidade	DNIT-ME 089/94
Equivalente Areia	DNIT-ME 054/94
Adesividade	DNIT-ME 079/94
Massa específica aparente	DNIT-ME 064/94
Densidade real, aparente e efetiva	DNIT-ME 081/94

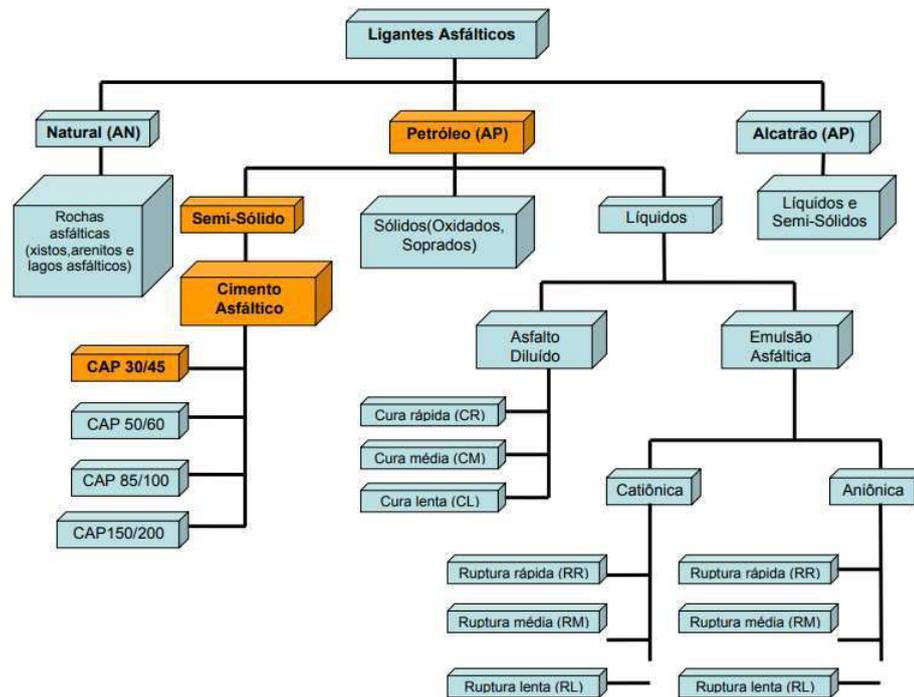
#### 2.1.1.2 Ligantes Asfálticos

Apesar de ser um elemento que pode ser encontrado na natureza, atualmente o ligante asfáltico também pode ser obtido a partir do refino do petróleo. É um material que apresenta comportamento visco-elástico a depender da temperatura, da frequência e da duração do carregamento imposto. Quando submetido a altas temperaturas se torna um fluido viscoso e se deforma. Caracterizando que o material chegou ao regime plástico uma vez que não retorna ao seu estado inicial. Entretanto quando submetidos a baixas temperaturas o ligante se deforma, mas volta ao seu estado inicial (MEDEIROS, 2009).

De acordo com o DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes), na Figura 1 pode-se observar as subdivisões dos tipos de ligantes asfálticos as três subdivisões maiores são: Ligante asfáltico natural (asfalto natural), ligante asfáltico de petróleo (asfalto de petróleo) e alcatrão.

O cimento asfáltico pode ser obtido naturalmente nas jazidas, cimento asfáltico natural (CAN) ou produzido a partir da destilação do petróleo, cimento asfáltico de petróleo (CAP). É obtido para apresentar características adequadas para construção de pavimentos. São semissólidos a temperatura ambiente, e necessitam serem submetidos a altas temperaturas para o perfeito envolvimento com os agregados. Possuem características de flexibilidade, durabilidade, aglutinação, impermeabilização e elevada resistência à ação da maioria dos ácidos, sais e álcalis (MEDEIROS, 2009).

Figura 1 – Classificação dos ligantes asfálticos segundo o DNIT



Fonte: Adaptado de DNIT (1996)

Os asfaltos diluídos são obtidos da diluição dos cimentos asfálticos em solventes derivados do petróleo, esse processo é realizado quando é necessário eliminar ou diminuir o aquecimento do CAP. Esse solvente é apenas um meio para aplicação do CAP em serviços de pavimentação, após a aplicação ele evapora, ficando apenas o CAP. Essa evaporação é chamada de cura do asfalto diluído que pode ocorrer de forma rápida, média ou lenta. A emulsão asfáltica é uma dispersão coloidal de uma fase aquosa em uma fase asfáltica (direta), ou, então, uma fase aquosa dispersa em uma fase asfáltica (inversa), com ajuda de um emulsificante. O objetivo dessa mistura é dar estabilidade ao conjunto, favorecer a dispersão e revestir os glóbulos de betume de uma partícula protetora, mantendo-os em suspensão. As emulsões asfálticas são obtidas da mistura do CAP com polímero, que modificam características de desempenho através da incorporação de aditivos químicos e elastômeros (MEDEIROS, 2009).

### 2.1.1.3 Fíler

Componente da mistura asfáltica que tem como finalidade preencher os vazios entre os agregados graúdos e também alterar as propriedades dos ligantes asfálticos, agindo como parte ativa da combinação ligante asfáltico, fíler e ar. Servindo assim, como lubrificante das partículas dos agregados maiores, afetando os vazios do agregado, as características de compactação e teor

ótimo do ligante asfáltico (BARDINI, 2009).

Segundo Santana (1995), a adição de fíler pode melhorar o comportamento reológico, mecânico, térmico e de sensibilidade à água, desde que obedecidos os limites para granulometria e plasticidade.

Na Figura 2, está ilustrado materiais que podem funcionar como fíler em misturas asfálticas, como a cal hidratada, o cimento Portland, pó calcário, dentre outros.

Figura 2 – Fíler: a) Cimento Portland; b) Cal Hidratada



### 2.1.2 Deformação Permanente

A deformação permanente é ocasionada por diversos fatores como a angularidade, forma e textura do agregado. Estudos comprovam que agregados mais rugosos e com uma maior angularidade originam misturas mais resistentes a deformação permanente. Além disso, o ligante asfáltico que possui maior consistência (resistência a penetração) possivelmente formará misturas mais resistentes a deformação permanente. Entretanto, essa característica do ligante não ajuda a evitar esse fenômeno pois o mesmo é submetido a altas temperaturas e nessas condições o mesmo apresenta comportamento visco-elástico (ONOFRE et al., 2013).

Além dos fatores citados, a energia de compactação é mais um deles e influência em um ganho de resistência quando aplicada a materiais de granulometria contínua, porém um aumento excessivo na energia de compactação faz com que os finos da mistura ocupem os vazios existentes aumentando a distância entre os agregados graúdos e consequentemente favorecendo a deformação permanente ou trilha de roda. Logo, é recomendável que se obtenha

um pavimento que mesmo após compactado pelo tráfego ofereça valor de volume de vazios não inferior a 3%. Evitando assim um possível afundamento do pavimento asfáltico (MOURA, 2010).

O pavimento deve ser dimensionado visando diminuir ou até mesmo evitar que ocorra a deformação permanente uma vez que a mesma diminui o conforto dos usuários que transitam em rodovias com tais problemas, diminuindo a segurança do usuário que dispõe de um pavimento onde a condição de dirigibilidade é perigosa e onde a aderência (hidroplanagem) em períodos de chuva é comprometida aumentando consideravelmente os custos operacionais. Essa patologia pode dificultar a manutenção ou reabilitação dos pavimentos (BERNUCCI et al., 2008).

### 2.1.3 Fadiga

A fadiga de um pavimento asfáltico pode ser entendida como um rompimento do mesmo quando submetido a esforços de tensão e extensão repetidos, até o aparecimento de fissuras no material que evoluem para trincas ou até mesmo acontecendo o rompimento completo após certo número de solicitações. Esse fenômeno está diretamente ligado a deformabilidade resiliente das camadas pavimento, especialmente da camada do subleito. Com base nisto o pavimento é dimensionado através de modelos que visam reproduzir o número de repetições de carga com o estado de tensões aplicadas, deformações de tração no revestimento asfáltico e de compressão na camada de terraplenagem (TRICHÊS; FONTES, 2017).

Diversos podem ser os causadores de fadiga no pavimento asfáltico dentre eles podem ser citados: fatores de carga (magnitude do carregamento; tipo do carregamento; forma do carregamento; frequência, duração e tempo entre aplicações sucessivas de carregamento), fatores de mistura (granulometria, tipo, forma e textura do agregado; penetração e teor do ligante; temperatura da mistura e energia de compactação), fatores ambientais (temperatura e umidade) além de outras propriedades como módulo de resiliência e índice de vazios (JUNIOR, 2004).

Segundo Bernucci et. al. (2008) procurando formas para que não ocorra fadiga no pavimento buscar-se: (i) baixa rigidez para evitar elevada absorção de tensões que levem ao trincamento prematuro do revestimento, e (ii) alta resistência à tração, uma vez que em geral uma maior resistência na ruptura é também associada a uma maior resistência à fadiga.

## 2.2 MISTURAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS

Misturas asfálticas modificadas são fabricadas a partir da adição de materiais que visam na maioria dos casos proporcionar uma mistura mais resistente a propriedades mecânicas como fadiga e deformação permanente, dentre outras características. Dentre tantos materiais podemos citar os polímeros, as ceras e os óleos.

### 2.2.1 Polímeros

Polímeros são modificadores do asfalto formados por macromoléculas nas quais um mesmo grupo de átomos é repetido muitas vezes. Existem diferentes tipos de polímeros, entretanto apenas alguns podem ser utilizados de maneira vantajosa (economicamente ou tecnicamente) para modificação de misturas asfálticas. Eles podem ser classificados em termoplásticos e em termo fixos ou termorrígidos. Os primeiros são aqueles que quando submetidos a altas temperaturas amolecem de forma reversível sendo possível utiliza-los para compor as misturas asfálticas, já os termorrígidos são aqueles que ao serem submetidos ao calor endurecem de maneira irreversível não sendo utilizados em misturas asfálticas devido tal propriedade (HOMEM, 2002).

Estudos comprovam que a adição de polímeros ao CAP traz vantagens, como em relação as misturas densas eles garantem uma maior resistência a ocorrência de deformações permanentes, aumento da vida de fadiga, redução da espessura da camada do pavimento, melhor coesão e adesão frente à ação da água e do tráfego; em relação as camadas drenantes acarretam uma maior resistência à ação da água e ao desprendimento agregado devido ao tráfego, além do aumento do potencial drenante do pavimento; em camadas de absorção de tensões proporciona uma manutenção das propriedades elásticas sob maior faixa de temperatura, que o asfalto convencional, minimização da reflexão de trincas do pavimento antigo para o novo, aumento da ligação entre as camadas asfálticas e maior absorção das tensões, permitindo ao projetista diminuir a espessura das camadas asfálticas (JÚNIOR, 2015)

Apesar das inúmeras vantagens o seu uso é ainda limitado devido a desvantagens como o alto custo, a alta sensibilidade à temperatura de alguns polímeros modificadores, baixa resistência ao envelhecimento, problemas de separação de fase durante o armazenamento (estocagem) que geralmente são ocasionados por falta de compatibilidade entre o polímero e o CAP e, ainda, melhoria limitada da elasticidade à baixas temperaturas (JÚNIOR, 2015).

Dentre a infinidade de polímeros que podem ser utilizados como modificadores de asfalto podemos citar o SBS (eStireno-Butadieno-eStireno), EVA (polietileno-Vinil-Acetato),

SBR (estireno-Butadieno-Rubber), dentre outros. Na Figura 3, está ilustrado alguns exemplos de polímeros modificadores de asfalto.

Figura 3 – Polímeros: (a) SBS; (b) EVA



### 2.2.2 Óleos

Os resíduos de óleos são em sua maioria, descartados no meio ambiente, trazendo prejuízos ao mesmo. Uma forma que pode vir a minimizar tais prejuízos é a utilização do óleo residual nas misturas asfálticas com o objetivo de diminuir a temperatura de trabalho das mesmas, uma vez que misturas asfálticas usinadas a quente são fabricadas e compactadas a temperaturas superiores a 150<sup>o</sup>C. Com a diminuição das temperaturas de usinagem e compactação da mistura, obtém-se misturas mornas ou semimornas que podem vir a trazer benefícios para a qualidade do pavimento e a diminuição dos danos ao meio ambiente, uma vez que as temperaturas elevadas das misturas usinadas a quente emitem gases que intensificam o efeito estufa (PORTUGAL, 2016).

Existem diversos estudos sobre as propriedades mecânicas de misturas asfálticas com cimento asfáltico modificado com óleos, onde diferentes autores adicionam óleos como os de mamona, girassol, linhaça dentre outros. Souza (2012), adicionou teores variando de 2% a 10% de óleo de mamona. Ele reduziu a viscosidade do CAP para as temperaturas de usinagem e compactação, acarretando em uma diminuição em média de 8<sup>o</sup>C, para isso foi adicionado 5% de óleo de mamona, que refletiu na melhoria da trabalhabilidade da mistura asfáltica (SOUZA, 2012). Na Figura 4, estão ilustrados o óleo de mamona e o óleo de girassol.

Figura 4 – Óleos: (a) Mamona; (b) Girassol

(a)



(b)



Fonte: Terra

### 2.2.3 Ceras

As ceras podem ser obtidas a partir de produtos naturais ou sintetizadas em laboratório. Independente da forma de obtenção em ligantes asfálticos as ceras são adicionadas com o objetivo de diminuir a temperatura de usinagem e compactação. Contudo procurando não modificar as propriedades tais como módulo dinâmico e fadiga em relação as misturas asfálticas convencionais. Estudos apontam que as ceras diminuem a viscosidade de usinagem e compactação das misturas e um aumento dessa viscosidade no período de uso do pavimento (MORAES, 2018).

A diminuição da temperatura das misturas asfálticas através da adição de ceras pode diminuir o envelhecimento das mesmas a curto e a longo prazo. Uma vez que altas temperaturas podem provocar envelhecimento a curto prazo do ligante asfáltico. No entanto segundo estudos outro parâmetro que pode ser prejudicado com a utilização de ceras é o dano causado pela deformação permanente uma vez que as misturas mornas normalmente não apresentam rigidez necessária para evitar tal dano, mas que pode ser contornado com a escolha de uma granulometria adequada que forneça maior intertravamento entre as partículas (FILHO, 2013). Na Figura 5 pode ser observado exemplos de ceras naturais como a cera de abelha e cera de carnaúba.

Figura 5 – Ceras naturais: (a) Cera de abelha; (b) Cera de carnaúba



(a)



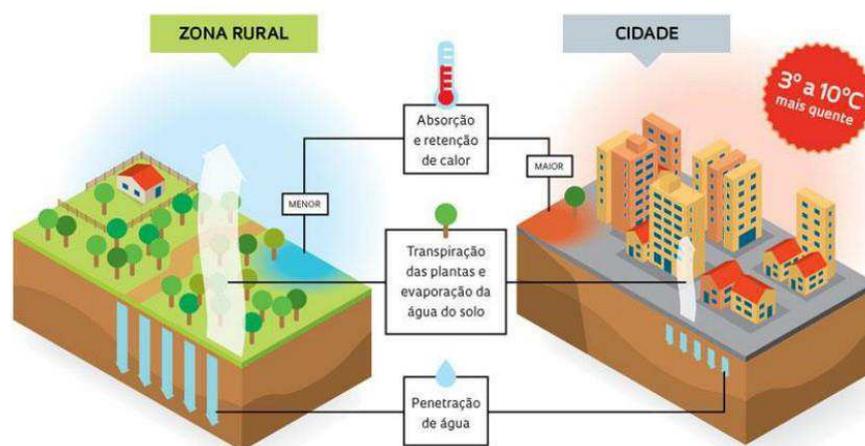
(b)

Fonte: Fenixceras

### 2.3 ILHA DE CALOR URBANO

Segundo Costa (2009), “Ilha de Calor se refere a uma anomalia térmica resultante, entre outros fatores, das diferenças de absorção e armazenamento de energia solar pelos materiais constituintes da superfície urbana”. Como consequências disso áreas densamente povoadas sofrem um incremento na temperatura ambiente em relação a áreas pouco povoadas. A Figura 6, ilustra resumidamente fatores que intensificam esse fenômeno.

Figura 6 – Ilha de Calor Urbana



Fonte: Fapesp

Após a segunda guerra mundial o crescimento da população urbana acelerou bastante. A população que mora nas áreas urbanas atualmente chega a 50% (3,4 bilhões) de acordo com

a Population Reference Bureau. Estima-se que esse número chegue a 60% (5,0 bilhões) em 2030, ou seja, espera uma migração aproximadamente de dois bilhões de pessoas para o meio urbano. Aliado a este crescimento a urbanização vem causando danos colaterais a população. Neste contexto surgiu pela primeira vez em 1818 um estudo sobre a Ilha de Calor Urbana (ICU) (MIRZAEI e HAGHIGAT, 2010).

A principal causa da ICU é a modificação da paisagem onde existia vegetação por uma área densamente pavimentada e com superfícies de concreto com características de baixa permeabilidade aliadas a alta absorção da irradiação solar (ROMEU e ZINZI, 2008).

#### 2.4 ALBEDO

O albedo é a característica que o material tem de refletir a radiação que incide sobre ele. Essa refletância é medida numa escala de 0 a 10 (ou 0 a 100%), quanto maior o albedo, mais reflexivo é o material. A utilização de materiais reflexivos é uma maneira de mitigar os dados ambientais provenientes da ilha de calor urbana. Na Figura 7, observa-se que a cor branca tem uma diferença de 3 a 5<sup>o</sup> C (mais fria) em relação a parede de tijolos ao seu redor.

Figura 7 – Efeito do albedo na superfície



Fonte: Cambridge Systematics (2005)

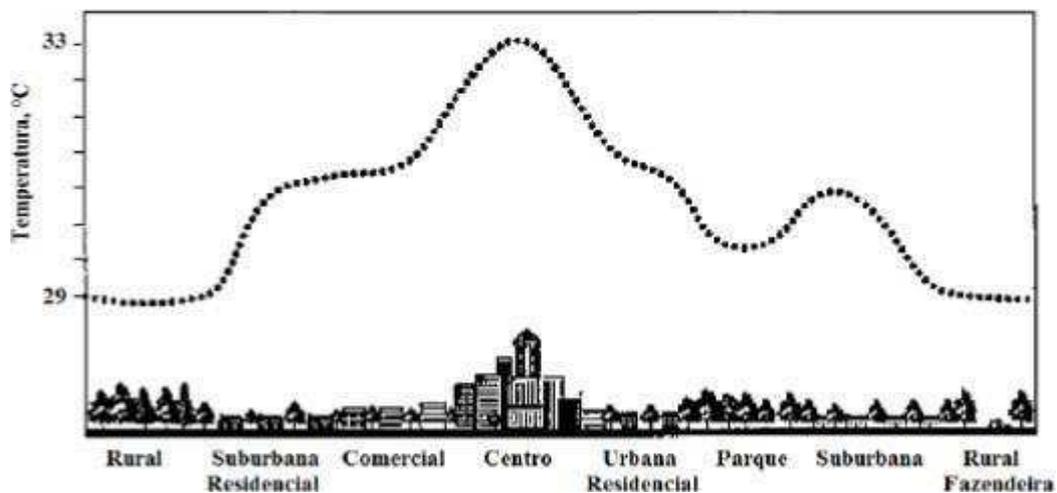
Uma maneira de manter as superfícies pavimentadas mais frias sob a incidência de radiação solar é aumentando o albedo das mesmas, pois ocorre a convecção do calor do pavimento para o ambiente, diminuindo a temperatura do ar. Essa redução da temperatura tende a diminuir a demanda de energia para refrigeração e retardar a formação de ozônio troposférico. Aliado a diminuição da temperatura do ambiente, do gasto de energia e melhor qualidade do ar

Synnefaet. al. (2011) mostrou que essa uma menor temperatura superficial dos pavimentos pode vir a trazer uma maior durabilidade da vida útil dos mesmos reduzindo as futuras manutenções. A característica de refletividade pode, também, ajudar a proporcionar uma melhor visibilidade à noite, o que reduziria a necessidade de iluminação trazendo economia de dinheiro e energia.

## 2.5 MISTURAS ASFÁLTICAS COLORIDAS

Entre os diferentes tipos de revestimento que podem ser utilizados em pavimentos urbanos, os principais são: revestimentos com mistura asfáltica, revestimentos com concreto Portland, revestimentos de peças pré-moldadas de concreto (pavers), blocos de pedra (paralelepípedo) e pedra tipo “petit pavê” que na sua coloração natural nas vias urbanas depende do tipo de rocha empregada e da idade do revestimento. A cor do pavimento acarreta importantes consequências ambientais. Um exemplo disso é a mistura asfáltica que por possuir preta gerar aquecimento do ar na região próxima à sua superfície, absorvendo grande porcentagem da radiação solar. Esses e outros malefícios que a coloração escura traz poderiam ser amenizados com o uso de materiais de cores mais claras. Tendo em vista a grande contribuição dos pavimentos para o aquecimento da superfície terrestre, as misturas asfálticas coloridas podem agir como elementos mitigadores do efeito da ICU (Ilha de Calor Urbana), que se traduz como um aumento da temperatura nas regiões urbanizadas em relação as regiões não urbanizadas circundantes, diferença entre as temperaturas no campo e na zona urbana está ilustrada na Figura 8 (VILLENA, 2014).

Figura 8 – Perfil geral da ilha de calor urbana



Fonte: Giridharan et al., 2004

As grandes construções nas áreas urbanizadas, os espaçamentos e a alturas entre as

mesmas, assim como as dimensões das ruas podem influenciar no calor absorvido pelo pavimento, assim como as demais estruturas. A disposição de edifícios altos e ruas estreitas favorece a formação de um cânion urbano, que tem dois efeitos: pode intensificar o efeito de ilha de calor significativamente reduzindo o resfriamento noturno radioativo, e ao mesmo tempo, a sombra dos edifícios durante o dia cobre a superfície do pavimento, limitando a absorção de calor dos mesmos (VILLENA,2014).

Nesse contexto surge a ideia de fabricação de um pavimento frio que é feito por meio da introdução de diferentes tipos de materiais e tecnologias. Dentre as técnicas utilizadas estão: acréscimo do albedo (medido através de uma taxa que é entendida como uma fração entre a energia refletida pelo meio em relação ao total de energia incidente no meio, ou seja, quanto maior a taxa de albedo maior será a refletância do meio) isso faz com que haja uma redução da energia absorvida pelo pavimento e o mantenha mais frio. As variações do albedo ocorrem devido aos diferentes usos do solo ou pela composição do mesmo. Assim existem superfícies que vão refletir de maneira mais eficiente os raios solares, o que não é o caso do revestimento asfáltico que absorve boa parte desses raios, principalmente devido a sua coloração. Como resultado, os ambientes urbanos se tornam mais desconfortáveis termicamente quando comparados aos ambientes rurais (MARTINS, 2011). Na Figura 9, é possível visualizar os valores de albedo para os diferentes tipos de superfícies.

Figura 9 – Taxa de albedo para diferentes tipos de superfícies



Fonte: FARNDON, John. Dicionário escolar da Terra.Londres: Buttler&Ianner, 1996. P.141.

Incrementos na permeabilidade ajudam a resfriar a superfície por permitirem a passagem de água e o vapor de água por seus poros e controle da textura do pavimento: neste

caso a velocidade do fluxo de ar é modificada, promovendo o esfriamento da superfície pelo fluxo de ar convectivo. Assim, pavimentos flexíveis ou rígidos podem ser utilizados com essa finalidade sem que haja comprometimento na sua resistência estrutural.

#### 2.5.1 Finalidade Das Misturas Asfálticas Coloridas

Com a finalidade de proporcionar a mistura uma menor absorção de energia e atingir menores temperaturas superficiais em relação aos materiais convencionais surgem à ideia de pavimentos frios. Estudos revelam como mecanismos para obtenção de pavimentos frios: aumento da refletância superficial, que pode diminuir a quantidade de radiação solar absorvida pelo pavimento; incremento da permeabilidade do revestimento, o qual resfria o pavimento através da evaporação da água; e uma estrutura composta dos dois anteriores para redução do ruído, a qual também emite menores níveis de calor à noite (SYNNEFA et al., 2011).

#### 2.5.2 Tipos de Misturas Asfálticas Coloridas

As misturas asfálticas coloridas são obtidas a partir da adição de pigmentos, que são substâncias orgânicas ou inorgânicas, insolúveis ou substancialmente insolúveis na água ou meio aquoso. Sendo eles capazes de fornecer cor, opacidades, rigidez mecânica dentre outras propriedades a fase a qual estão dispersos (BENDIGANAVALLE e MALSHE, 2008).

Os pigmentos derivados de OMM (Óxidos Metálicos Mistos) devido as suas propriedades são ideais para serem utilizados na indústria de materiais frios, dentre uma das possibilidades a adição dos mesmos à mistura asfáltica. Existem diversas estruturas convencionais, entretanto, elas podem ser modificadas com diversos tipos de óxidos metálicos, a fim de apoiar a reação ou alterar a sua coloração. Segundo Bauxbaum e Pfaff (2005), por serem soluções químicas sólidas, a estrutura dos OMM é composta de uma variedade de óxidos metálicos homogeneamente distribuídos na rede cristalina do novo composto químico, como se fosse uma solução, porém no estado sólido.

Esses pigmentos derivados de óxidos metálicos podem ser amarelos, vermelhos, verdes, marrons, dentre outras cores, a depender da composição da sua estrutura cristalina. Villena (2014) relaciona na sua pesquisa as características físicas químicas dos óxidos utilizados na sua pesquisa, apresentando a sua composição e estrutura como no Quadro 2.

Quadro 2 – Características físicas e químicas dos pigmentos estudados

<b>Pigmento</b>	<b>Nome</b>	<b>Denominação Química</b>	<b>Forma</b>	<b>Massa Específica(g/cm<sup>3</sup>)</b>
Amarelo	Bayferrox 921	Óxido de ferro	Acilular (Pó)	4,00
Marrom A	Bayferrox 975 M	Óxido de ferro sintético	Irregular (Pó)	4,20
Marrom B	Bayferrox 601 M	Óxido de ferro sintético	Irregular (Pó)	4,20
Marrom C	Bayferrox 658 M	Óxido de ferro sintético	Irregular (Pó)	4,60
Preto	Bayferrox 318	Óxido de ferro sintético	Esférica (Pó)	4,60
Verde	Colortherm Green GN	Óxido de cromo	Esférica (Pó)	5,20
Vermelho A	Bayferrox 120	Óxido de ferro sintético	Esférica (Pó)	5,00
Vermelho B	Nosbur Color+ R	Óxido de ferro sintético (80%) e resinas (20%)	Cilíndrica (Pó)	2,35

Fonte: Villena (2014)

Essa composição das características químicas e da estrutura cristalina dos óxidos metálicos é o que vai dar cor as misturas asfálticas coloridas a depender do óxido utilizado. Nesta pesquisa foi utilizado o óxido de ferro sintético (vermelho A), obtido com o mesmo fabricante que Villena (2014). Logo, no presente trabalho foi adotado que as características físicas e químicas do óxido utilizado são as mesmas que tal autor utilizou na sua pesquisa.

### 2.5.3 Fabricação de Misturas Asfálticas Coloridas

O pavimento asfáltico convencional, devido a sua coloração escura absorve uma alta quantidade de energia que é transformada em calor, promovendo um enorme desconforto térmico para as pessoas que vivem nesse ambiente. As misturas asfálticas coloridas são

resultado da dosagem adequada de ligante, agregado e o incremento de um pigmento de óxido metálico que confere uma tonalidade mais clara a mistura. Synnefa *et. al.* (2011) mostrou em seu estudo o grande potencial do uso dos pigmentos nas misturas asfálticas, entretanto elas foram elaboradas com ligante albino, que permitiu que os pigmentos de OMM pudessem refletir, de forma muito eficiente, a radiação nos ensaios realizados.

Segundo Villena (2014) “O ligante utilizado pelos pesquisadores está disponível para comércio nos Estados Unidos e nos países europeus servindo, principalmente, para a construção de ciclovias, vias para ônibus, pistas de atletismo, parques, ou algum outro pavimento com exigências estéticas. Existe, porém, a dificuldade do uso deste material no Brasil e na América Latina, já que o ligante albino ainda não é produzido em escala comercial pela indústria”.

#### 2.5.4 Deformação Permanente em Misturas Asfálticas Coloridas

Devido as altas temperaturas e o carregamento lento, o ligante asfáltico se comporta como fluido viscoso e se deforma, situação que pode ser atribuído ao ligante um comportamento plástico (após o ligante fluir o mesmo não retorna a sua posição inicial), no entanto quando submetidos a baixas temperaturas e sob carregamentos rápidos, os ligantes se comportam como quase sólidos elásticos. A adição de pigmentos segundo Villena (2014) influencia no enrijecimento das misturas asfálticas uma vez que diminuem a temperatura das mesmas para mensurar esse parâmetro mecânico realizasse o ensaio de deformação permanente permitindo assim uma comparação da deformação plástica entre a mistura de referência e a mistura colorida.

Segundo Villena (2014), a deformação na trilha de roda das placas ensaiadas foi inferior a amostra de referência, sendo está a única que apresentou um afundamento superior a 10%. Comportamento que o mesmo atribuiu ao aumento da consistência do ligante asfáltico devido a adição de pigmentos, à melhora da adesividade entre o ligante e o agregado e ao incremento dos pontos de contato intergranulares promovidos pela adição de material fino (pigmento) na mistura.

Na sua pesquisa Villena (2014), verificou que as misturas coloridas quase dobram o valor de resistência a deformação permanente e segundo ele isso se deve as mesmas absorverem uma menor quantidade de radiação solar. No seu estudo além dos ensaios nas misturas coloridas e da mistura de referência, ele diminuiu a temperatura de ensaio das misturas colorida e verificou que o dano a deformação permanente diminuía em até 75%, concluindo que as misturas coloridas possivelmente teriam uma vida útil em campo maior quanto a formação de trilha de roda.

A altas temperaturas as reações físicas e químicas são dominantes e aceleram no processo de envelhecimento do ligante sendo associadas a diminuição da resistência à fadiga da mistura.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo foi dedicado a descrição dos materiais utilizados e as especificações para a obtenção das propriedades físicas dos agregados, e do ligante asfáltico, assim como os procedimentos utilizados para estudar o comportamento mecânico das misturas asfálticas. A parte experimental da pesquisa foi realizada no Laboratório de Engenharia de Pavimentos – LEP, localizado na Universidade Federal de Campina Grande – UFCG.

#### 3.1 MATERIAIS

##### 3.1.1 Óxido Metálico

Dentre a diversidade de óxidos metálicos existentes, optou-se pelo uso do óxido que apresenta coloração vermelha. Devido aos bons resultados que Villena (2014) obteve usando o mesmo no seu trabalho. O óxido metálico obtido foi do tipo óxido de ferro do fabricante Lanxess, foi adquirido o óxido de ferro do mesmo fabricante que o usado por Villena (2014). Na Figura 10, está ilustrado o óxido utilizado.

Figura 10 – Pigmento Vermelho A



##### 3.1.1 Agregados Graúdos

Foram utilizados nessa pesquisa os agregados graúdos (Figura 11) brita 19mm e abrita 12,5mm, fornecidas pela Pedreira Rocha Cavalcante - PB. Seguindo a norma DNIT-PRO 199/96 a amostra foi selecionada por quarteamento (método B).

Figura 11 – Agregados graúdos: (a) Brita 19mm; (b) Brita 12,5mm

(a)



(b)



### 3.1.2 Agregado Miúdo

Nesta pesquisa o agregado miúdo empregado foi a Areia (Figura 12). A amostra foi selecionada de acordo com o método C da norma DNIT-PRO 199/96.

Figura 12 – Agregado miúdo: Areia



### 3.1.1 Fíler

Nessa pesquisa os materiais escolhidos como filer para mistura foram a cal hidratada da marca MegaO (Figura 13), obtida no comércio de Campina Grande e o pó de pedra.

Figura 13 – Fíler: (a) Cal hidratada; (b) Pó de pedra  
(a) (b)



### 3.1.2 Cimento asfáltico de petróleo (CAP)

O CAP 50/70 (Figura 14) fornecido pela pedreira Rocha Cavalcante, localizada no município de Campina Grande – PB, foi o ligante asfáltico utilizado na pesquisa.

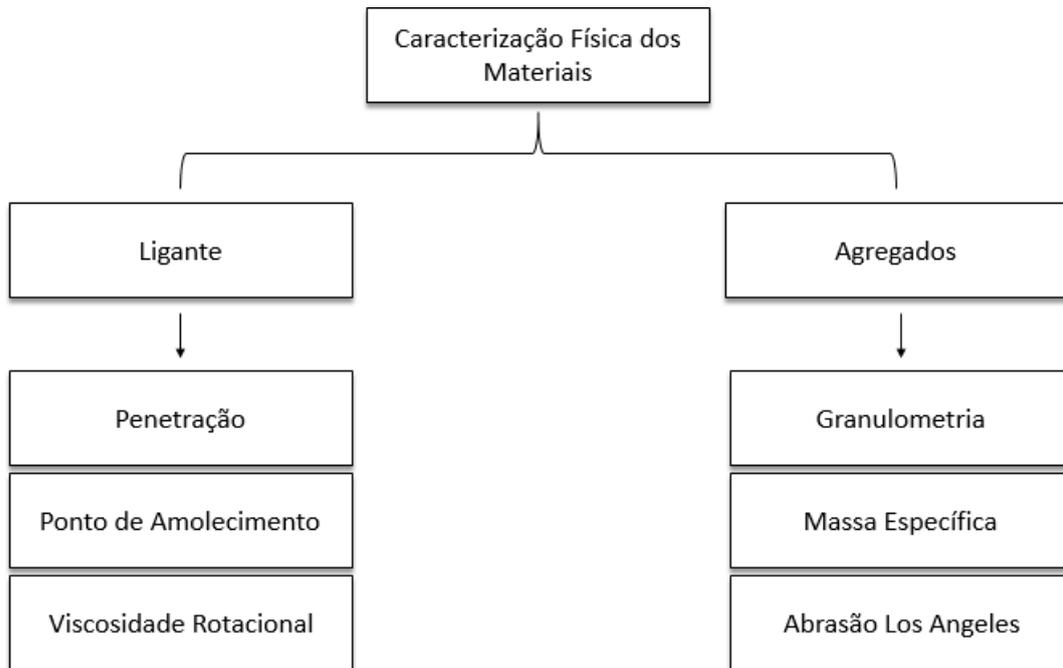
Figura 14 – Ligante asfáltico utilizado na pesquisa



Fonte: Pavimentação – Materiais Betuminosos

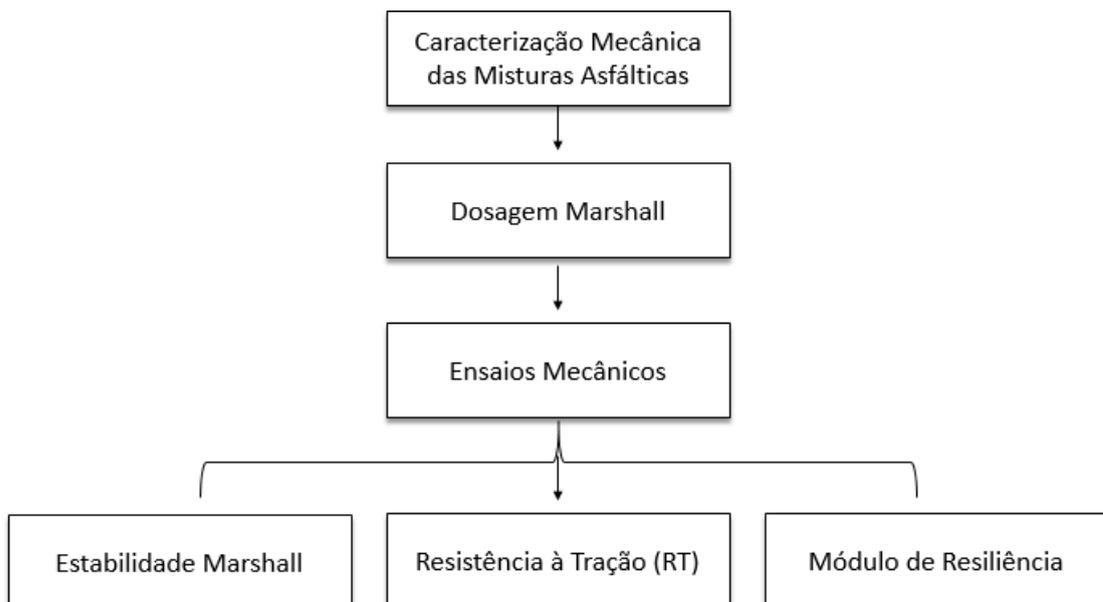
Os ensaios foram realizados de acordo com normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), do Departamento de Infraestrutura e Transportes (DNIT). O Fluxograma apresentado da Figura 15, mostra o programa experimental adotado para pesquisa.

Figura 15 – Fluxograma da caracterização experimental realizada



A segunda etapa da pesquisa, refere-se ao estudo e análise das propriedades mecânicas das misturas asfálticas convencionais e com adição de corante. O fluxograma da Figura 16 apresenta as etapas e os ensaios referentes ao programa experimental das propriedades mecânicas.

Figura 16 – Fluxograma da caracterização mecânica das misturas asfálticas



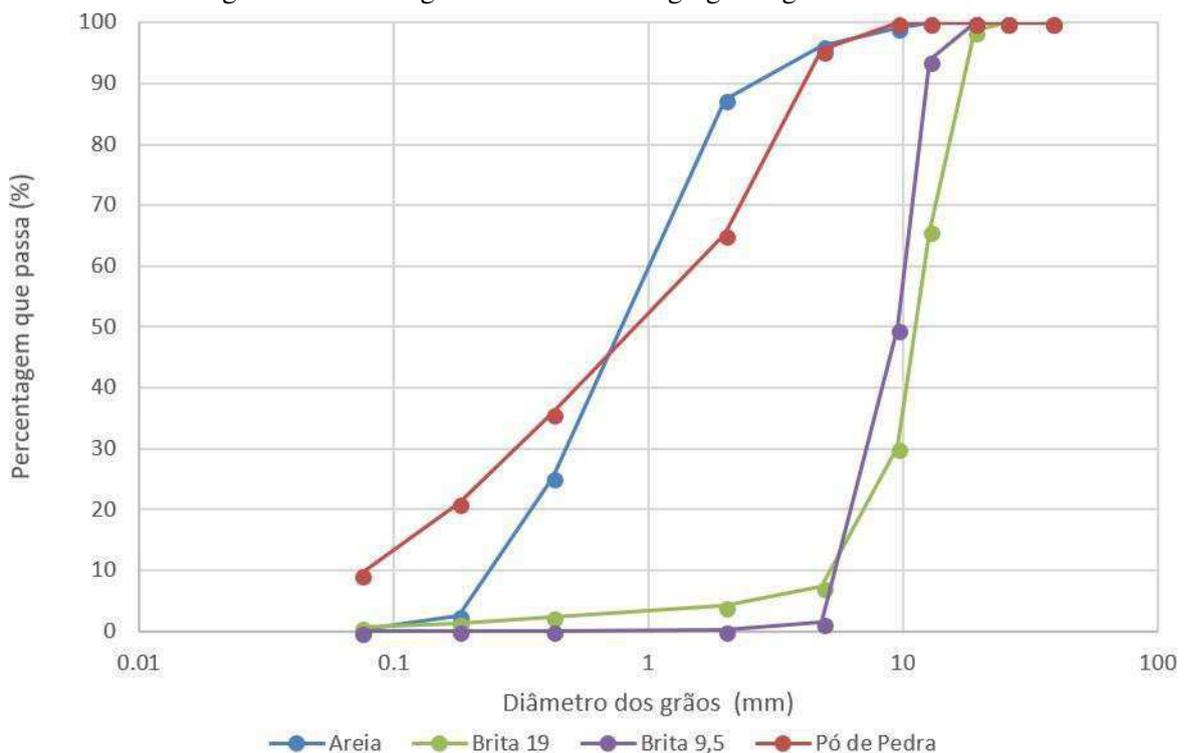
### 3.2 PROPRIEDADES FÍSICAS DO AGREGADO

Para a caracterização dos agregados (grãos e miúdos) usados nas misturas estudadas, foram realizados os ensaios de granulometria, massa específica e abrasão “Los Angeles”. Nessa seção eles são apresentados os resultados obtidos nos ensaios.

#### 3.2.1 Distribuição granulométrica dos grãos

Normalizada pela norma DNIT – ME 083/98, a distribuição granulométrica dos grãos dos agregados grãos e miúdo é obtida, e a partir desses dados é gerada a curva granulométrica do agregado. O procedimento consiste no peneiramento dos grãos por uma série de peneiras objetivando determinar a percentagem em peso que cada faixa especificada de tamanhos de grãos representa na massa total ensaiada, possibilitando assim a obtenção da curva de distribuição dos tamanhos das partículas (Figura 17).

Figura 17 – Curva granulométrica dos agregados grãos e miúdos



Os resultados oriundos do ensaio de granulometria, foram utilizados para determinação das porcentagens dos materiais na dosagem das misturas asfálticas.

#### 3.2.2 Massa Específica

A massa específica é uma relação entre massa e volume do agregado, dentro desse

conceito existem três grandezas: massa específica real, aparente e efetiva. A massa específica aparente é obtida pela relação da massa do agregado seco e seu volume, incluindo seus vazios permeáveis. Já a massa específica real é uma relação de massa e volume, determinada excluindo os vazios permeáveis.

De acordo com a norma DNIT-ME 081-98, foi realizado o procedimento para determinação da massa específica aparente dos agregados graúdos, ambos passaram na peneira 4,8mm e o material retido na mesma foi lavado e depois seco em estufa e após um período secando a temperatura ambiente foi imerso em água (Figura 18) por 24 horas. Posteriormente secou-se a superfície do material com um pano, pesou-se o material e imediatamente após o mesmo, foi colocado em um recipiente que se encontrava imerso em água dentro e em cima de uma balança, e foi verificada a sua massa. Finalmente, o material ensaiado foi colocado seco a temperatura ambiente e verificou-se sua massa seca. Com esses dados foi obtida a massa específica aparente (Equação 1) e a massa específica real (Equação 2).

$$d = \frac{m}{m_s - m_a} \quad (1)$$

$$d = \frac{m_s}{m_s - m_a} \quad (2)$$

Onde:

- d: é a massa específica do agregado seco, em gramas por centímetros cúbicos;
- m: é a massa ao ar da amostra seca, em gramas;
- m<sub>s</sub>: é a massa em água da amostra na condição superfície seca, em gramas;
- m<sub>a</sub>: é a massa em água da amostra, em gramas.

Figura 18 – Brita 19mm e brita 12,5mm imersas em água para realização do ensaio de massa específica



Seguindo as especificações do DNIT-ME 084-95 foi realizada a determinação da massa específica real. Inicialmente foi peneirada a amostra nas peneiras 4,8 mm e 0,075 mm e 500g do que ficou retido entre elas. No procedimento a amostra foi imersa em água por 24 horas e depois seca, posteriormente, pesou-se o picnômetro vazio, o mesmo foi cheio de areia (Figura 19) e o conjunto foi pesado novamente, depois é adicionada água no mesmo e colocado em banho maria por 1h, por fim, adiciona-se água até encher o picnômetro e pesou-se o conteúdo do frasco. Finalmente, o picnômetro é cheio de água e novamente é pesado.

Figura 19 – Ensaio de massa específica do agregado miúdo



Os valores da massa específica real e aparente dos agregados graúdos e miúdos utilizados nessa pesquisa estão mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Massa específica real e aparente dos agregados graúdos e miúdo

Tabela 1 – Massa específica real e aparente dos agregados graúdos e miúdo

Agregados		Massa específica real (g/cm <sup>3</sup> )	Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )
Agregado graúdo	Brita 19mm	2,53	2,52
	Brita 12,5mm	2,56	2,51
Agregado miúdo	Areia	2,38	2,39
	Fíler	Pó de pedra	2,43

### 3.2.3 Determinação da abrasão “Los Angeles”

Os agregados utilizados em pavimentação devem possuir uma resistência ao desgaste. O ensaio de abrasão mede esse desgaste que ocorre no agregado graúdo quando submetido a usinagem da mistura. O procedimento foi realizado de acordo com a norma DNIT – ME 035/98.

O agregado foi colocado na máquina Los Angeles juntamente à carga abrasiva, submetida às rotações desta máquina à velocidade de 30 rpm à 33 rpm.

No interior da máquina possuem esferas de ferro fundido que caem sobre os agregados assim como os agregados caem um sobre os outros, além de se desgastarem pelo atrito com as paredes do tambor quando submetidos a rotações do tambor reproduzindo assim o impacto sofrido pelo agregado durante a usinagem da mistura. Ao final das rotações, o material foi retirado do tambor e o desgaste foi expresso por meio da avaliação da massa de agregados retidos na peneira nº 12 (1,7mm) antes e depois das rotações, é que se obtém o índice de abrasão. O resultado do ensaio está expresso na Tabela 2, o valor máximo aceitável de abrasão para o agregado é de 50%.

Tabela 2 – Resultado do ensaio de abrasão Los Angeles

Ensaio	Requisito		Agregados graúdos	
	min	max	Brita 19mm	Brita 12,5mm
Abrasão Los Angeles	-	50%	31,33%	25,40%

### 3.3 CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO

Nessa seção serão apresentados os ensaios utilizados na caracterização do cimento asfáltico de petróleo usado como ligante nas misturas estudadas, bem como os resultados obtidos. Objetivando caracterizar o ligante utilizado nessa pesquisa foram realizados os seguintes ensaios de caracterização: penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional.

#### 3.3.1 Ponto de amolecimento

Seguindo as especificações da norma DNIT ME-131/10 o ponto de amolecimento é determinado empiricamente como sendo a menor temperatura em que uma esfera padronizada atravessa um anel padronizado preenchido com ligante asfáltico percorrendo uma distância, sob condições específicas. Determina-se assim a temperatura na qual o asfalto amolece.

#### 3.3.2 Penetração

O ensaio de penetração determina a dureza, uma medida de consistência do material betuminoso, segue as especificações da norma DNIT ME-155/10 onde nela é determinada uma

profundidade, em décimos de milímetros, que uma agulha padronizada penetra verticalmente uma amostra preparada segundo condições específicas de carga, tempo e temperatura. A dureza desse material é representada pela penetração dessa agulha padrão de 100g numa amostra de CAP, por 5 segundos, à temperatura de 25°C. O resultado do ensaio é utilizado para classificação do cimento asfáltico.

### 3.3.3 Viscosidade Rotacional-Viscosímetro Brookfield

A viscosidade é uma propriedade que o fluido possui de resistir ao escoamento. De acordo com a norma NBR 15184/05 utiliza-se um spindle (ponta de prova), imerso numa amostra de material betuminoso, submetido a uma rotação constante verificando o torque necessário para rotacionar o spindle que está em contato com a amostra consequentemente rotacionada, a uma velocidade específica, nas temperaturas 135°C, 150°C e 177°C. Visando uma perfeita cobertura dos agregados pelo material betuminoso é feito o estudo da viscosidade fazendo-se importante para se determinar a faixa ideal de temperatura que o asfalto deve possuir durante essa mistura. Assim como faz-se importante na determinação da faixa de temperatura ideal de compactação do pavimento asfáltico quando o mesmo é aplicado na pista.

Os dados de caracterização do ligante asfáltico estão organizados na Tabela 3. A norma DNIT 095/06-EM fixa características exigíveis para a classificação dos cimentos asfálticos empregados na pavimentação. De acordo com a mesma, observou-se que o ligante utilizado está dentro dos limites fixados no que diz respeito ao ensaio de penetração e viscosidade, já no ensaio de ponto de amolecimento não se classifica dentro dos limites estabelecidos em norma. A Tabela 4, apresenta o resultado do ensaio de viscosidade que possibilitou a determinação da temperatura de compactação e de usinagem da mistura.

Tabela 3 – Resumo da caracterização do ligante

<b>Ensaio</b>	<b>Unid.</b>	<b>Limites</b>	<b>CAP</b>
		<b>CAP 50 - 70</b>	
Penetração (100 g, 5s, 25°C)	dmm	50 – 70	54,4
Ponto de amolecimento, mín	°C	46	45,5
Viscosidade Rotacional	cP		
- a 135°C, SP 21 mín. 20 rpm		274	385,0
- a 150°C, SP 21 mín.		112	195,0

- a 177°C, SP 21 mín

57 – 285 71,5

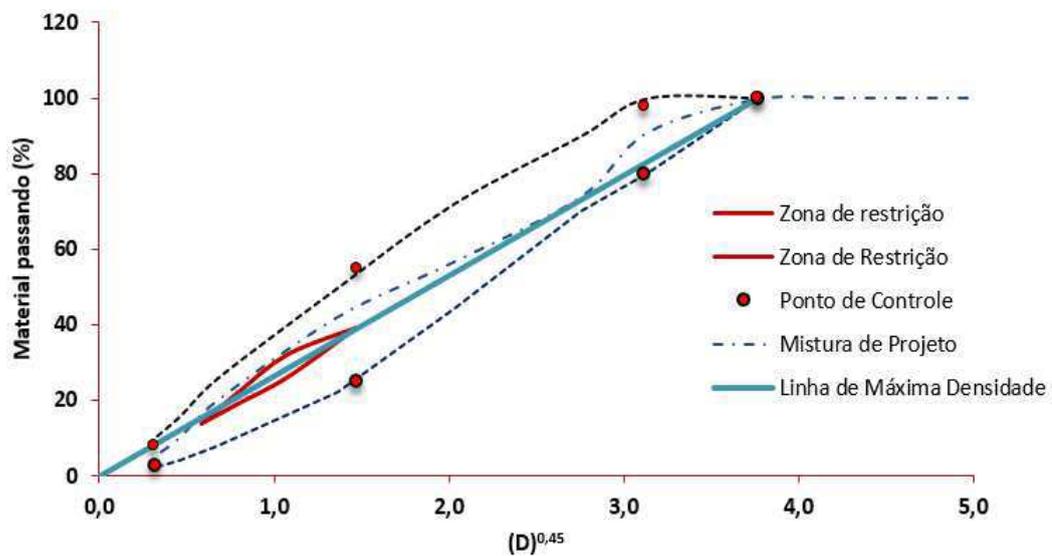
Tabela 4 – Temperatura de usinagem e compactação

Temperatura de usinagem e compactação	Unid.	CAP
Temperatura de usinagem do ligante	°C	159°
Temperatura de usinagem do agregado	°C	169°
Temperatura de compactação da mistura	°C	145°

### 3.4 DOSAGEM MARSHALL

A dosagem Marshall, normatizada pelo DNIT-ME 043/95 foi escolhida objetivando determinar o teor ótimo de ligante asfáltico para uma curva granulométrica pré-definida. Após obter os resultados de massa específica dos agregados, foi selecionada a faixa granulométrica a ser usada para confecção dos corpos de prova, enquadrando a mesma na curva de Fuller seguindo as especificações da faixa C estabelecida pelo DNIT.

Figura 20: Curva de Fuller

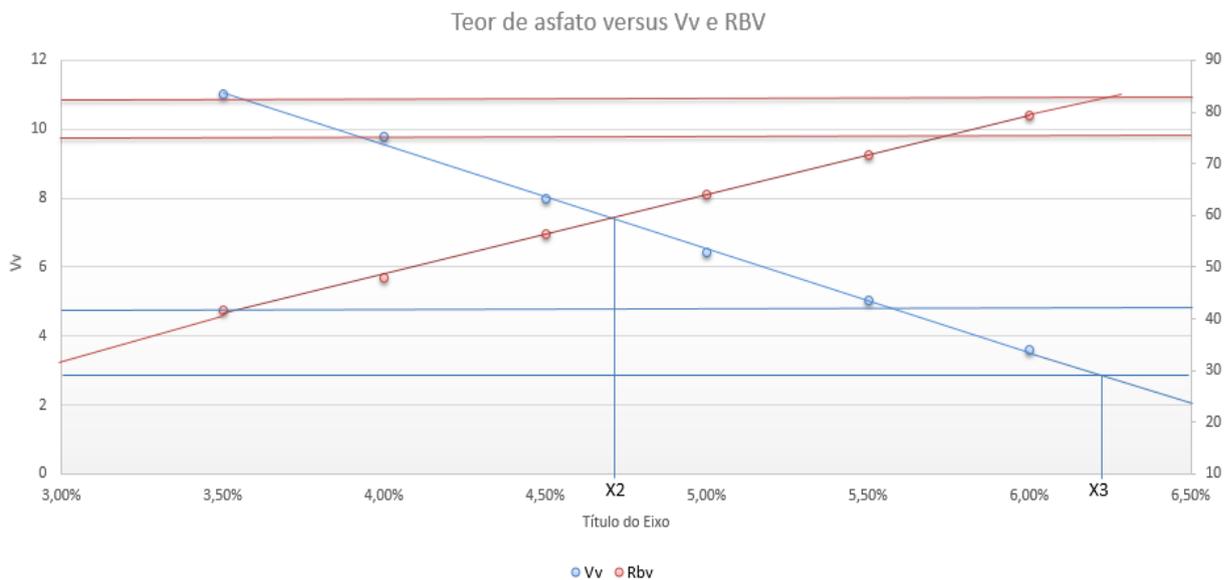


A partir da escolha da faixa, foi possível a escolha da composição dos agregados utilizados na mistura. Para realização da dosagem, o agregado e o ligante foram aquecidos separadamente, até a temperatura de 169°C e 159°C, respectivamente. Posteriormente, são misturados mantendo-se a temperatura da mistura (145°C), ambas foram previamente determinadas no ensaio de viscosidade (Tabela 6). Em seguida, a mistura é colocada em um molde e compactada com um soquete caindo de uma altura determinada. Foram moldados 15

corpos de prova, três para cada teor de ligante asfáltico testado, seguindo especificações de Bernucci et. al. (2008). Nesta pesquisa, adotaram-se os teores iniciais de 3,5; 4,0; 4,5; 5,0 e 5,5% de CAP.

Os corpos de prova foram moldados misturados em painelas e posteriormente compactados com a aplicação de 75 golpes com um soquete em ambas as faces. Após a sua compactação foi necessário esperar que os corpos de prova esfriassem para que fossem retirados dos moldes metálicos. Os mesmos foram pesados secos e submersos e foram retirados as medidas de alturas e diâmetros. Com essas informações obtidas foi possível calcular o volume de vazios (Vv) e a relação betume/vazios (RBV) e com esses parâmetros (Figura 21) determinou-se a porcentagem de ligante ótimo para produção dos corpos de prova.

Figura 21: Teor de asfalto x Vv x RBV



Os corpos de provas fabricados foram submetidos a ensaios onde foram avaliadas as suas propriedades mecânicas. A Tabela 5 apresenta os requisitos necessários para a obtenção do teor ótimo de ligante asfáltico.

Tabela 5 – Requisitos da dosagem de concreto asfáltico DNIT-ES 031/2004

<b>Características</b>	<b>Camada de rolamento</b>	<b>Camada de ligação</b>
Vv, %	3 – 5	4 – 6
RBV, %	74 – 82	65 – 72
Estabilidade mín, kgf (75 golpes)	500	500
RT a 25 <sup>o</sup> C K mín., Mpa	0,65	0,65

Fonte: Bernucci et al. (2008)

Neste estudo o teor de ligante ótimo foi de 5,5%, o que proporcionou um volume de

vazios de 5% e um RBV de 74% atendendo as especificações do DNIT para uma camada de rolamento.

A mistura colorida (Figura 22) foi obtida com a adição de 5% de corante. Villena (2014), utilizou a porcentagem de 4,0% em suas misturas asfálticas; entretanto, nas suas sugestões para futuras pesquisas o mesmo citou que os ensaios de refletância solar em laboratório mostraram que o uso de 2% a 6% do pigmento não alteraria significativamente o valor da refletância.

Figura 22 – Mistura asfáltica colorida (corpo de prova)



### 3.5 ENSAIOS MECÂNICOS

Nessa seção serão apresentados os ensaios mecânicos utilizados para determinação da resistência das misturas asfálticas estudadas. Foram realizados os seguintes ensaios de caracterização: estabilidade Marshall, resistência a tração, módulo de resiliência.

#### 3.5.1 Estabilidade Marshall

O ensaio é realizado segundo a norma DNIT ME 043/95 e mede a resistência máxima, em N (Kgf), a compressão diametral, de um corpo de prova ensaiado segunda a norma. A importância desse ensaio está no fato de que a mistura deve ter resistência ao cisalhamento compatível com os esforços que serão aplicados a ela. O procedimento inicia-se com a imersão dos corpos de prova em banho-maria, por um período de 30 a 40 minutos, em seguida cada corpo de prova é colocado em um molde de compressão que deve estar na temperatura de 60<sup>o</sup> C, o molde de compressão, contendo o corpo- de-prova, é posicionado na prensa segundo a

geratriz e o medidores de fluência são colocados e ajustados na posição de ensaio, a prensa (Figura 23) é operada de tal modo que seu êmbolo se eleve a uma velocidade de 5 cm por minuto, até o rompimento do corpo-de-prova, o que é observado no defletômetro pela indicação de um máximo. A leitura deste máximo será anotada e convertida em N (kgf), pelo gráfico de calibração do anel dinamométrico. A carga, em N (kgf), necessária para produzir o rompimento do corpo-de-prova à temperatura especificada, é anotada como “estabilidade lida”. Este valor deverá ser corrigido para a espessura do corpo-de-prova (encontra-se na tabela da norma) ou através da fórmula a seguir:  $F = 927,23 h^{4,64}$ ; Onde: f = fator; h = espessura do corpo-de-prova. O resultado assim obtido é o valor da estabilidade Marshall.

Figura 23 – Prensa para realização do ensaio Estabilidade Marshall



### 3.2.1 Resistência à tração por compressão diametral (RT)

Este ensaio foi realizado seguindo as especificações da norma DNIT 136/10-ME. Inicialmente foi medido três diâmetros paralelos e quatro alturas diametralmente opostas do corpo de prova, com um paquímetro a média dos valores correspondem respectivamente o diâmetro e a altura do corpo de prova. Colocou-se o corpo de prova em estufa até obter a temperatura  $25^{\circ}\text{C} \pm 0,1^{\circ}\text{C}$ , posteriormente o corpo de prova foi posicionado em uma superfície cilíndrica (Figura 24) entre dois frisos metálicos, quando ajustados os pratos para exercer uma leve compressão, capaz de manter o corpo de prova aplicou-se a carga progressivamente com uma velocidade de deformação de  $0,8 \pm 0,1 \text{ mm/s}$ , até que se dê a ruptura, por separação das duas metades do corpo-de-prova, segundo o plano diametral vertical obtendo-se a carga de ruptura que

determina a tensão máxima suportada pela mistura asfáltica antes da sua ruptura. A resistência à tração foi determinada pela equação:

- $\sigma_t$  = 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.
- O resultado final foi a média de pelo menos 3 resultados, expresso em MPa.

Figura 24 – Ensaio de Resistência a Tração



### 3.2.2 Módulo de resiliência (MR)

Ao aplicarmos uma carga cíclica obtemos uma relação entre tensão horizontal e a deformação horizontal que resulta do deslocamento horizontal recuperável. A essa deformação elástica ou recuperável das camadas de pavimentos submetidos a carregamentos repetidos é chamada de deformação resiliente. Para as misturadas estudadas o ensaio do módulo de resiliência foi realizado por meio da norma brasileira DNIT 135/2017 na prensa hidráulica (Figura 25). O princípio do ensaio é baseado 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.

Para misturas a 25<sup>o</sup> C, os valores de módulo de resiliência normalmente se enquadram na faixa de 2 000 a 8 000 MPa, onde segundo Villena (2014) os menores valores correspondem a misturas com ligantes modificados por polímeros ou por borracha e os maiores a misturas

com asfaltos de consistência dura. Contudo, é importante avaliar a influência da distribuição granulométrica, do tamanho máximo do agregado, da cor do ligante e da idade da mistura.

Figura 25 – Ensaio de Módulo de Resiliência



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios mecânicos de resistência a tração, módulo de resiliência e estabilidade Marshall.

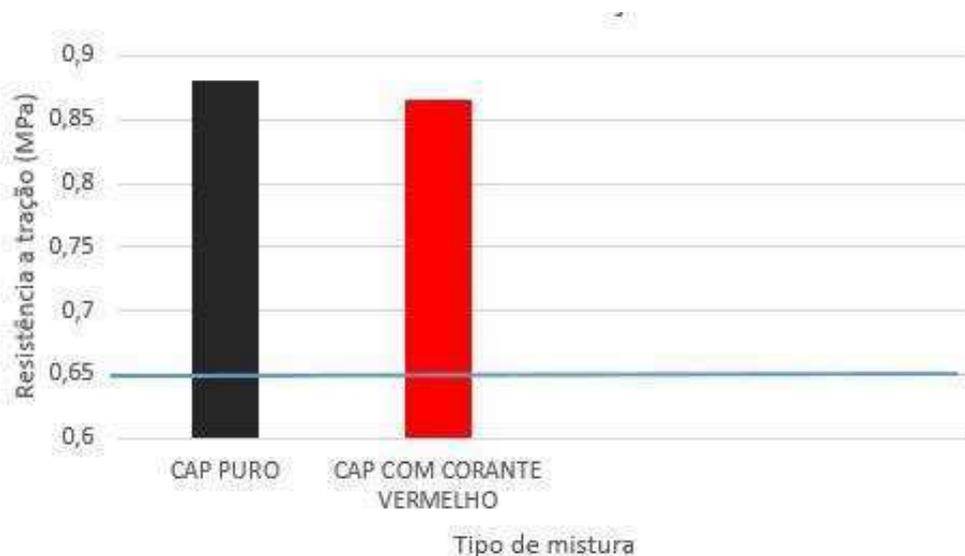
### 4.1 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (RT)

Nessa pesquisa foram realizados dois tipos de misturas, a mistura de referência com o CAP puro e a mistura colorida fabricada com adição de corante (vermelha). A Tabela 6 apresenta os resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral para as misturas asfálticas coloridas como também das misturas asfálticas de referência. Na Figura 26 é apresentado o valor da média dos ensaios realizados em três corpos de prova para cada tipo de mistura. De acordo com a norma DNIT-ES 031/2004 o valor mínimo para resistência a tração é de 0,65 MPa para camadas de rolamento.

Tabela 6 – Resistência a tração das misturas asfálticas

<b>CAP com corante</b>	<b>RT, MPa</b>	<b>CAP PURO</b>	<b>RT, MPa</b>
I	0,87	I	0,92
II	0,86	II	0,84
III	0,87	III	0,89
Média	0,87	Média	0,88

Figura 26 – Resistência a Tração



A tabela 6 apresentou valores de resistência a tração superiores a 0,65 MPa. Entretanto, a adição

de corante não aumentou a resistência a tração significativamente, tal qual observado por Villena (2014). Em sua pesquisa, observou um aumento de 29,17% do valor de resistência a tração da mistura colorida em relação a mistura de referência. Enquanto, que nos ensaios realizados neste trabalho podemos observar na Tabela 6, que a resistência a tração da mistura colorida apresentou redução de 1,70% em relação a mistura de referência. No entanto, isso não compromete a resistência da mesma que atende aos requisitos mínimos estabelecidos por norma para camadas de rolamento.

O comportamento diferente do esperado pode ter sido ocasionado por diversos fatores, dentre eles podendo citar erros na hora da realização da compactação e um teor de corante de 5,0% superior aos 4,0% usados por Villena (2014). A adição de 5,0% de corante proporcionou o aumento da rigidez da mistura, uma vez que para adicionar o corante é preciso retirar porcentagens de agregados graúdos e miúdos, o que possivelmente, diminuiu os parâmetros mecânicos da amostra.

Outro fator importante é que em seu trabalho Villena (2014), adicionou 4% de corante, entretanto ponderou essa quantidade de corante adicionado em todos os outros componentes, inclusive do teor de ligante ótimo, fato que não ocorreu nesse trabalho e que pode ter comprometido os parâmetros mecânicos da mistura, deixando-a com muitos finos. Assim, observou-se que nas misturas asfálticas estudadas nesta pesquisa, uma alta porcentagem de mastique (CAP + finos) o que comprometeu a resistência da mistura asfáltica.

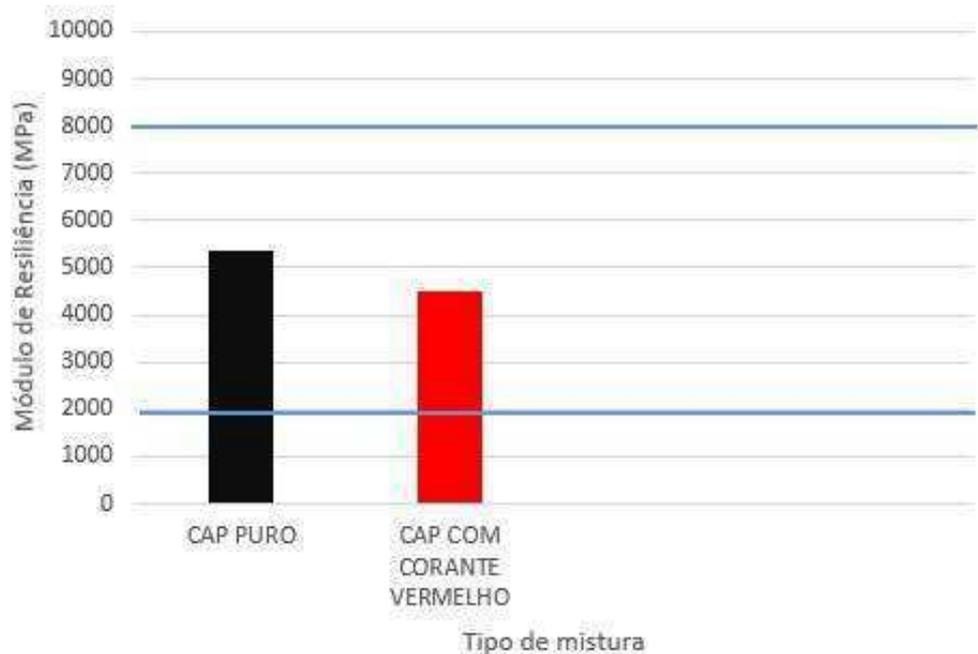
#### 4.2 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

A Tabela 7, apresenta os resultados para o ensaio de módulo de resiliência para as misturas asfálticas de referência (CAP puro) e para as misturas asfálticas coloridas (CAP com corante). Foram ensaiados três corpos de prova para cada tipo de mistura, as médias dos resultados de cada um deles estão representadas no gráfico da Figura 27.

Tabela 7 – Resistência a tração das misturas asfálticas

CAP com corante	MR, MPa	CAP PURO	MR, MPa
I	3915	I	4342
II	5116	II	5742
III	4535	III	6055
Média	4522	Média	5379

Figura 27 – Módulo de resiliência das misturas estudadas



Bernucci et. al. (2008) afirma que a temperatura de 25<sup>o</sup> os valores de módulo de resiliência para misturas asfálticas densas devem se encontrar numa faixa de 2000 a 8000 MPa, logo podemos observar que os resultados dessa pesquisa se enquadraram nessa faixa.

Segundo Villena (2014), a adição de pigmentos aumenta o valor do módulo resiliente das misturas asfálticas, devido principalmente, ao aumento da consistência do ligante e melhora da adesividade entre ligante e o agregado granítico. Entretanto, na presente pesquisa os valores de módulo de resiliência não aumentaram em relação a mistura de referência. Na pesquisa realizada por Villena (2014), o módulo de resiliência da mistura colorida aumentou em 45,3% em relação a mistura de referência. De acordo com os resultados obtidos, observando-se a Tabela 7 vemos que nesse estudo a mistura colorida diminuiu em 15,94% o seu módulo de resiliência em relação a mistura de referência.

As possíveis causas são as mesmas referentes a diminuição da resistência a tração: erros na compactação, adição de 5% de corante deixando a mistura muito rígida devido à presença excessiva de finos.

Outro parâmetro mecânico que pode ser analisado a partir dos ensaios realizados é a razão MR/RT que vem sendo usada como um indicador da vida de fadiga de misturas, uma vez que agrega informações de rigidez e resistência, sendo mais desejável um valor pequeno da razão, dado que com frequência busca-se (i) baixa rigidez para evitar elevada absorção de tensões, que levam ao trincamento prematuro do revestimento, e (ii) alta resistência à tração, uma vez que em geral uma maior resistência na ruptura é também associada a uma maior

resistência à fadiga (Bernucci et al.,2008).

Nessa pesquisa, a relação MR/ RT para as misturas convencionais foi 6113 e para as misturas com adição de pigmento foi 5198. Indicando uma vida de fadiga maior para as misturas coloridas. Entretanto, vale salientar, que esse parâmetro é apenas uma simplificação, não eliminando a necessidade de realização de ensaios de fadiga, que consideram diferentes níveis de tensão.

#### 4.3 ESTABILIDADE MARSHALL

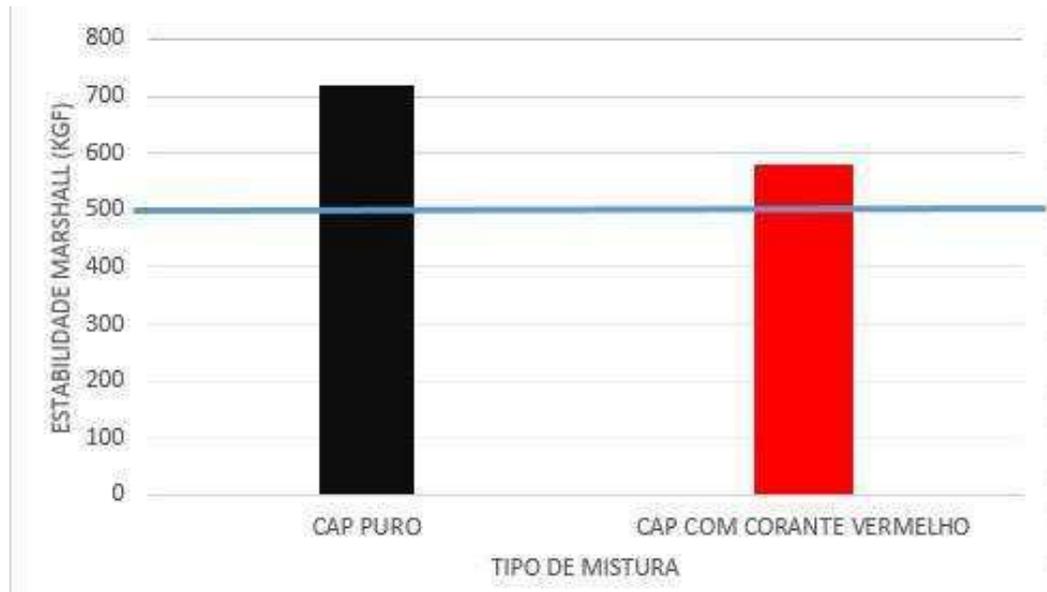
A Tabela 8, apresenta os resultados obtidos para o ensaio de estabilidade Marshall para as misturas asfálticas analisadas, foram realizados ensaios com três corpos de prova para cada tipo de mistura. No gráfico da Figura 28, está representado as médias dos resultados para cada tipo de mistura.

Tabela 8 – Estabilidade Marshall

<b>CAP com corante</b>	<b>Kgf</b>	<b>CAP PURO</b>	<b>Kgf</b>
I	651	I	1144
II	592	II	296
III	493	III	720
Média	579	Média	720

A norma DNIT-ES 031/2004 estabelece que os valores mínimos de estabilidade Marshall para camada de revestimento é 500 Kgf, como pode ser observando tanto a mistura de referência quanto a colorida obtiveram valores de estabilidade superiores aos exigidos por norma. Comparando os resultados da amostra de referência com os da amostra com corante, vemos que houve uma redução em média 19,63% dos valores estabilidade Marshall para a mistura colorida em relação a mistura convencional.

Figura 28 – Estabilidade Marshall



## 4 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Nesse tópico são apresentadas as conclusões obtidas nesse estudo e as sugestões para futuras pesquisas nessa área.

### 4.1 CONCLUSÕES

Nessa pesquisa foi estudada a influência da adição de óxidos metálicos nas misturas asfálticas, utilizando o pigmento da cor vermelho e analisando os parâmetros mecânicos da nova mistura em comparação com a mistura convencional. A partir dos ensaios realizados obtivemos os seguintes resultados:

A adição de óxido metálico ocasionou uma redução da resistência à tração. Entretanto, todas as misturas asfálticas estudadas (modificadas ou não) apresentaram-se dentro do especificado na norma.

Para o ensaio de Módulo de Resiliência observou-se que todas as misturas asfálticas estudadas (modificadas ou não) apresentaram os resultados que atendem as especificações da norma. No entanto, a adição de corante reduziu em 15,94% esse parâmetro mecânico nas misturas estudadas.

As misturas estudadas, apresentam estabilidade Marshall superior dos valores mínimos exigidos pelas normas, no entanto a adição de corante resultou em um desempenho inferior ao observado nas misturas convencionais.

De modo geral os parâmetros mecânicos das misturas modificadas com óxidos metálicos sofreram uma redução. No entanto, isso não impede o seu uso em pavimentos uma vez que, todos os parâmetros avaliados foram superiores aos exigidos em norma.

### 4.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Diante dos estudos realizados e resultados obtidos nesse trabalho, são sugeridos os seguintes tópicos:

- Enquadrar uma curva granulométrica que apresente uma proporção menor de finos, devido a granulometria do corante;
- Realizar outros ensaios de caracterização mecânica, como por exemplo, módulo dinâmico, fadiga e flow number, com objetivo de melhorar a caracterização mecânica destas amostras.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT - **NBR 15184** – Materiais Betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando viscosímetro rotacional, São Paulo, 2005.
- Alibaba**<<https://portuguese.alibaba.com/product-detail/thermoplastic-elastomer-sbs-110526670.html>> Acessado em julho de 2018
- BARDINI, V. S. S; KLINSKY. L. M.G; JÚNIOR, J. L. F. **A importância do fíler para o bom desempenho das misturas asfálticas.** 2009. Disponível em: [http://www.fipai.org.br/Minerva%2007\(01\)%2009.pdf](http://www.fipai.org.br/Minerva%2007(01)%2009.pdf) . Acesso em: 14 jul. 2018.
- BAUXBAUM, G.; PFAFF, G. **Industrial Inorganic Pigments**, Wiley-Vch Verlag GmbH & Co KGaA, Weinheim, Germany, 2005. p. 313.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B.
- Pavimentação Asfáltica: Formação básica para engenheiros.** 3ªed. Rio de Janeiro: Petrobras – Asfalto/ABEDA, 2008. 475p.
- BERNUCCI, Liede Bariani et al. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros,** 3. Ed. Rio de Janeiro: [s.n], 2008. 496p. Disponível em: < <http://www.ufjf.br/pavimentacao/files/2011/08/Pavimenta%C3%A7%C3%A3o-Asf%C3%A1ltica-cap4.pdf> >. Acesso em: 15 fev. 2018.
- CARDOSO, E. R. **Estudo da distribuição de vazios em misturas asfáltica de alto desempenho do tipo SMA utilizando tomografia computadorizada.** 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Cambridge Systematics, Inc. **Cool Pavement Report.** Maryland: [s.n.], 2005. CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de rodovias 2016: relatório gerencial.** Brasília, 2015.
- COSTA, Eduino Rodrigues. **O campo termo-higrométrico infra-urbano e a formação de ilhas de calor e de frescor urbanas em Santa Maria/RS.** 2009. Dissertação (Mestrado em Geografia e Geociências), Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.
- DNIT 095:** Cimentos asfálticos de petróleo - Especificação de material. Rio de Janeiro, 2006.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.

**DNIT ME 131:** Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.

**DNIT ME 155:** Material asfáltico – Determinação da penetração – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.

**DNIT -ME 043:** Misturas betuminosas a quente: Ensaio Marshall: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.

**DNIT -ME 083:** Agregados: Análise granulométrica: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.

**DNIT-ME 035:** Agregados: Determinação da abrasão “Los Angeles”: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.

**DNIT-ME 136:** Pavimentação asfáltica – misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.

**DNIT-PRO 199:** Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório. Rio de Janeiro, 1996.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE **DNIT**

– **ME 081/ 98** - Agregados - Determinação da Absorção e da Densidade de Agregado graúdo – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE **DNIT**

- **ME 084/95** – Agregado miúdo - determinação da densidade real. Rio de Janeiro, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **DNIT**

- **ME 135/17** – Pavimentação Asfáltica – Misturas Asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

**DNIT 031 ES** Pavimentos Flexíveis - Concreto Asfáltico. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro, 2004.

FARNDON, John. Dicionário escolar da Terra. Londres: Buttler&Ianner, 1996. P.141

**Fenix Ceras Abelha** < <http://www.fenixceras.com.br/> > Acessado em maio de 2016.

FILHO, Nelson Wargha. **Avaliação da influência da redução das temperaturas de usinagem e compactação no comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas.** Dissertação (Mestre em Engenharia de Transportes), Universidade Federal do Ceará, 2013.

GIRIDHARAN, R.; LAU, S.S.Y.; GANESAN, S. **Nocturnal heat island effect in urban residential developments of Hong Kong.** Energy and Buildings, v. 37, n. 9, 2005. p. 964–971.

HOMEM, Tiago da ROSA. **Comportamento de misturas asfálticas porosas com ligantes modificados por polímeros e adição de fibras.** Dissertação (Mestre em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 129 fls, 2002.

JUNIOR, Armando Morilha. **Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas .** 2004. 185 p. Dissertação de mestrado (Mestrado em Engenharia Civil)- Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2004. Disponível em:

<<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/87049/207429.pdf?sequence>>. Acesso em: 18 jun. 2018.

JUNIOR, José Manoel Rosa. **Estudo das propriedades reológicas do cimento asfáltico de petróleo (CAP 50/70) modificado com polímeros funcionalizados.** Dissertação (mestre em Engenharia Civil), Universidade Federal de Campina Grande, 95 fls, 2015.

JUNIOR, Osvaldo Tuchumantel. **Revestimentos asfálticos SMA.** Disponível em : < <http://www.der.pr.gov.br/arquivos/File/EncontrosTecnicos/6encontroTecnico/SMADE RPR.pdf> >. Acesso em: 03 jul. 2018.

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.

MALSHE, Vinod; BENDIGANAVALA, Ashwini. **Infrared Reflective Inorganic Pigments.** Recent Patents on Chemical Engineering, v. 1, n. 1, 2008. p. 67–79.

MARTINS, Alan. **O que é albedo?.** Disponível em: <<http://planetadoalan.blogspot.com.br/2011/06/o-que-e-albedo.html>>. Acesso em: 15 fev. 2018.

- MEDEIROS, Talita Rodrigues, **Materiais de construção experimental**. Campina Grande: [S.N],2009.143p. MIRZAEI, Parham a.; HAGHIGHAT, Fariborz. **Approaches to study Urban Heat Island – Abilities and limitations**. Building and Environment, v. 45, n. 10, 2010. p. 2192–2201.
- MOURA, Edson. **Estudo de deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas em pista e em laboratório**. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010.
- MORAES, Thalita Maria Ramos Pôrto. **Utilização da cera de carnaúba como aditivo redutor de temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas**. Dissertação (mestre em Engenharia Civil), Universidade Federal de Campina Grande, 135 fls, 2018.
- PINTO, Carlos de Souza. **Curso básico de mecânica dos solos**, 3. Ed. São Paulo. 363 pg.
- PORTUGAL, Antônio Carlos Xavier. **Avaliação reológica de cimentos asfálticos de petróleo modificados com óleo de soja e de milho**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Campina Grande, 2016.
- REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS. Disponível em [http://www.der.pr.gov.br/arquivos/File/EncontrosTecnicos/6encontroTecnico/SMADE\\_RPR.pdf](http://www.der.pr.gov.br/arquivos/File/EncontrosTecnicos/6encontroTecnico/SMADE_RPR.pdf)>. Acesso em: 15 fev. 2018.
- ROMEO, C.; ZINZI, M. **Impact of a cool roof application on the energy and comfort performance in an existing non-residential building. A Sicilian case study**. Energy and Buildings, 2011.
- SANTANA, H. **Considerações sobre os nebulosos conceitos e definições de filler em misturas asfálticas**. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 29., 1995, Cuiabá. Anais... Cuiabá: Associação Brasileira de Pavimentação, 1995.
- SOUZA, L. J. S. **Estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas com cimento asfáltico de petróleo modificado com óleo de mamona**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Campina Grande. 2012.
- Terra** < <https://www.terra.com.br/>> Acessado em junho de 2018.
- SYNNEFA, Afroditi; KARLESSI, Theoni; GAITANI, Nikiet *al.* **Experimental testing of cool colored thin layer asphalt and estimation of its potential to improve the urban**

**microclimate.** Building and Environment, v. 46, n. 1, 2011. p. 38–44.

TRICHÊS, Glicério; FONTES, Liseane P. T. da Luz. **Fadiga dos revestimentos.** 2017.

Disponível em:

<[http://www.grecaasfaltos.com.br/artigos\\_conteudo/fatos\\_e\\_asfaltos/fatos\\_10.pdf](http://www.grecaasfaltos.com.br/artigos_conteudo/fatos_e_asfaltos/fatos_10.pdf)>. Acesso em: 18 jun. 2018.

ONOFRE, Felipe Coutinho et al. **Avaliação do efeito de ligantes asfálticos modificados na resistência à deformação permanente de misturas asfálticas densas.** 2013. Disponível em:

<<https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/685/501>>. Acesso em: 19 jun. 2018.

VILLENA, Joe Arnaldo. **Uso de pigmentos de óxidos de metais mistos na pavimentação para mitigação de ilha de calor urbano.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, 437 fls, 2014.