

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE CENTRO DE
TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL
CAMPUS I – CAMPINA GRANDE
ÁREA GEOTÉCNICA**

Tássila Ramos Porto

**UTILIZAÇÃO DO ÓXIDO DE FERRO EM MISTURAS ASFÁLTICAS
OBJETIVANDO REDUZIR OS EFEITOS DAS ILHAS DE CALOR URBANO**

Campina Grande – PB

2019

TÁSSILA RAMOS PORTO

**UTILIZAÇÃO DO ÓXIDO DE FERRO EM MISTURAS ASFÁLTICAS
OBJETIVANDO REDUZIR OS EFEITOS DAS ILHAS DE CALOR URBANO**

Dissertação sujeita ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como componente dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental

Área de Concentração – Geotécnica

Orientador: Prof. Dsc. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena

Campina Grande – PB

2019

C748u

Porto, Tássila Ramos.

Utilização do óxido de ferro em misturas asfálticas objetivando reduzir os efeitos das ilhas de calor urbano / Tássila Ramos Porto. – Campina Grande-PB, 2019.

102 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2019.

"Orientação: Prof. Dr. Adriano Elisio de Figueiredo Lopes Lucena.

Referências.

1. Misturas Asfálticas. 2. Ilha de Calor Urbana. 3. Óxidos de Ferro. I. Lucena, Adriano Elisio de Figueiredo Lopes. II. Título.

CDU 665.637.3(043)

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autora: Tássila Ramos Porto

**Título: UTILIZAÇÃO DO ÓXIDO DE FERRO EM MISTURAS ASFÁLTICAS
OBJETIVANDO REDUZIR OS EFEITOS DAS ILHAS DE CALOR URBANO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de Concentração – Geotécnica

Dissertação defendida e aprovada em: / /

Pela Banca Examinadora

(Assinatura):

Prof. Dsc. (Orientador) Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

(Assinatura):

Prof. Dsc. (Avaliador Interno) Lívia Miranda

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

(Assinatura):

Prof. Dsc. (Avaliador Externo) Ricardo Almeida de Melo

Universidade Federal da Paraíba - UFPB

DEDICATÓRIA

A Deus por ser meu guia e minha fortaleza em todos os momentos. A minha família, pelo amor incondicional e todo apoio para que fosse possível a realização de mais uma vitória em minha vida.

Agradecimentos

A Deus, pelo dom da vida, e por ter me sustentado em todos os momentos, para que eu não desistisse, me dando forças para seguir e trilhar os melhores caminhos sempre.

Ao meu esposo, Bruno Dutra Gama, por ser mais que meu companheiro, meu verdadeiro amigo, a ele toda minha gratidão por me entender e querer sempre minha felicidade, por me ajudar em todos os momentos e por caminhar sempre comigo de mãos dadas me incentivando e me dando forças para continuar. Você é essencial em minha vida.

A minha família, que sempre foram apoio e incentivo, por sempre estarem dispostos a me ajudar, por toda dedicação me ensinando a ser forte, a ter caráter e nunca desistir. A minha mãe Maria Auxiliadora, meu grande espelho de mulher guerreira, que nunca mediu esforços para me ver bem, sempre presente ao meu lado, me fazendo acreditar que sou capaz, a ela toda minha gratidão. A meu pai Hélio, por todo incentivo, por me fazer acreditar sempre que o estudo é a maior herança, e por todo carinho e cuidado durante toda minha vida.

Aos meus avós Domicio e Cacilda por serem alicerces em nossa vida, por estarem sempre presentes com todo amor, carinho e cuidado que sempre demonstraram, por serem mais que avós para mim, a eles todo meu reconhecimento.

A minha irmã, Thalita Porto, por ser minha companheira fiel, por me fazer persistir e nunca desistir dos meus sonhos, por todo apoio, paciência e todos os ensinamentos.

Aos meus tios e primos, que sempre estiveram ao meu lado, torcendo e vibrando com as minhas conquistas.

A Fábio Roberto, Maria Heloísa, Ana Beatriz e Thiago, e a toda família do meu esposo que também é minha família por todo incentivo e por sempre torcerem por mim.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Adriano Elísio, por toda ajuda, dedicação, paciência, disponibilidade e por todo incentivo, sempre buscando meios para meu crescimento profissional.

A família LEP, em especial aos queridos professores, Adriano, Leda, Ana Maria, Kennedy e Veruska por toda receptividade, todo carinho, ajuda e ensinamentos.

A minha dupla companheira, Thamires Guerra, pelo companheirismo e por toda ajuda.

Aos amigos Chistian, Priscila, Daniel, Gabryelle, Jeovanesa, Mirtes, Jeovana, Wlysses, Valter, Jonny, Paulo, Joseildo, Jadilson, Artur, Ladijane, Vinicius, Ana Cecília e Mateus, obrigada por toda ajuda, incentivo e principalmente pela amizade de vocês.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECA), pela oportunidade e disponibilidade.

Ao Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP), por fornecer todos os meios para a realização da minha pesquisa.

A Capes pela bolsa fornecida, possibilitando dedicação total na minha vida acadêmica.

E a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito obrigada!

RESUMO

A preocupação com o meio ambiente tem se mostrado cada vez mais evidente tanto nos países desenvolvidos quanto nos que estão em crescente desenvolvimento. Visando garantir um maior bem-estar e condições favoráveis de vida a população tanto atual quanto futura, busca-se amenizar o acúmulo de grandes quantidades de calor nos centros urbanos, sobretudo nas áreas urbanas, que é justamente o fenômeno conhecido como Ilha de Calor Urbana (ICU), o qual caracteriza-se justamente pelo acréscimo de temperaturas urbanas em comparação com as áreas rurais. Sabendo-se ainda que, os terrenos naturais antes encontrados nos centros urbanos estão cada vez mais sendo substituídos pelas superfícies asfaltadas, as quais são um dos principais fatores que causam o aumento da temperatura ambiental, isso pode ser explicado devido, a cor escura dessas superfícies, que geram um aumento excessivo do calor, devido a sua baixa refletividade. Para minimizar tal impacto causado ao meio ambiente, sugere-se, portanto, o uso de materiais que absorvam menos calor, nesse caso, a utilização de superfícies mais claras, conseguidas com a incorporação de pigmentos as misturas asfálticas, que sejam capazes de refletir de fato a luz solar. Portanto, explica-se então, a escolha por incorporar óxido de ferro em misturas asfálticas, nas cores vermelho e amarelo, com o objetivo de avaliar o uso de corantes incorporado as misturas asfálticas, para serem utilizados em revestimentos urbanístico de vias que requeiram maior visibilidade e diferenciação de piso, com a intenção de aumentar a refletividade asfáltica, diminuindo dessa forma, as grandes quantidades de calor resultantes da absorção da radiação solar. Para atender esses objetivos, essa pesquisa foi estruturada em duas vertentes principais: primeiro, caracterização mecânica das misturas asfálticas com a incorporação do óxido de ferro, com o intuito de verificar a resistência dessas misturas após a adição do pigmento, e segundo, verificar se a adição de pigmentos reduz de maneira significativa a temperatura da superfície e aumenta a refletividade da mesma. Os resultados indicaram a viabilidade técnica da incorporação do Óxido de ferro a mistura, pois a adição de pigmentos permite aumentar a vida útil dessas misturas. Comparando-se os resultados obtidos para as misturas convencionais e as coloridas verificou-se que houve uma redução significativa na temperatura superficial dos revestimentos e aumento na refletividade solar influenciada pela cor da superfície.

Palavras chaves: Misturas Asfálticas, Ilha de Calor Urbana, Óxidos de ferro.

ABSTRACT

Concern for the environment has become increasingly evident in both developed and growing countries. Aiming at guaranteeing a better welfare and favorable living conditions for the current and future population, the aim is to soften the accumulation of large amounts of heat in urban centers, especially in urban areas, which is precisely the phenomenon known as Urban Heat Island. (ICU), which is characterized precisely by the increase of urban temperatures compared to the rural areas. It is also known that the natural land previously found in urban centers is increasingly being replaced by asphalted surfaces, which are one of the main factors causing the increase in ambient temperature. This can be explained by the dark color of these surfaces, which generate an excessive increase in heat due to its low reflectivity. To minimize this impact on the environment, it is therefore suggested to use less heat-absorbing materials, in this case the use of lighter surfaces, achieved by incorporating pigments into the asphalt mixtures, which are able to reflect Indeed sunlight. Therefore, we explain the choice to incorporate iron oxide in asphalt mixtures, in red and yellow colors, in order to evaluate the use of dyes incorporated in asphalt mixtures, to be used in urban coatings of roads that require greater visibility. and floor differentiation, with the intention of increasing asphalt reflectivity, thereby reducing the large amounts of heat resulting from the absorption of solar radiation. To meet these objectives, this research was structured in two main strands: first, mechanical characterization of asphalt mixtures with the incorporation of iron oxide, in order to verify the resistance of these mixtures after the addition of pigment, and second, to verify whether The addition of pigments significantly reduces surface temperature and increases surface reflectivity. The results indicated the technical viability of the incorporation of iron oxide in the mixture, as the addition of pigments increases the useful life of these mixtures. Comparing the results obtained for conventional and colored mixtures, it was found that there was a significant reduction in the surface temperature of the coatings and increase in solar reflectivity influenced by the surface color.

Keywords: Asphalt Mixtures, Urban Heat Island, Iron Oxides.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura de um pavimento flexível.....	24
Figura 2 - Estrutura de pavimento rígido.....	25
Figura 3 - Estrutura de pavimento semirrígido.....	25
Figura 4 - Estrutura de pavimento	27
Figura 5 - Perfil da ilha de calor urbana	29
Figura 6 - Efeito da Ilha de Calor Urbana – Cidade X Zona Rural.....	30
Figura 7- Piranômetro.....	33
Figura 8 - Pirheliômetro	34
Figura 9 - Espectrofotômetro.....	34
Figura 10 - Medidor de Radiação Solar – Power Meter.....	35
Figura 11 - Trecho da estrada Dona Castorina, Rio de Janeiro.....	36
Figura 12 - Trecho da Ilha do Fundão, Rio de Janeiro.	37
Figura 13 - Estrutura da magnetita, sistema cristalino isométrico	39
Figura 14 - Estrutura da Hematita, sistema cristalino hexagonal	40
Figura 15 - Fachada de Concreto Colorido em Residência.....	42
Figura 16 - Ponte em Concreto Colorido.....	42
Figura 17 – Etapas da Pesquisa	44
Figura 18 - Caracterização dos materiais	45
Figura 19 - CAP 50/70	45
Figura 20 - Agregados: areia, pó de pedra, brita 12.5mm e brita 19mm.....	46
Figura 21 - Óxido de Ferro.....	46
Figura 22 - Curva granulométrica dos agregados.....	48
Figura 23 - Penetrômetro	52
Figura 24 - Ensaio de penetração antes e após o RTFO	53
Figura 25 - Realização do ensaio de ponto de amolecimento	54
Figura 26 - Ponto de amolecimento antes e após envelhecimento em RTFO.....	54
Figura 27 - Viscosímetro Brookfield.....	55
Figura 28 - Aparelho de RTFO	57
Figura 29 - Viscosidade rotacional do CAP 50/70	56
Figura 30 - Fluxograma de dosagem SUPERPAVE	58
Figura 31 - Compactador Giratório SUPERPAVE	59
Figura 32 - Curva granulométrica Superior.....	60

Figura 33 - Curva granulométrica Intermediária	60
Figura 34 - Curva granulométrica Inferior	61
Figura 35 - Equipamentos para ensaio de determinação do Gmm	61
Figura 36 - Corpos de prova com teor inicial de 5% de ligante CAP 50/70 puro	63
Figura 37 - Determinação do teor de projeto	64
Figura 38 - Corpos de prova com o óxido de ferro vermelho e amarelo	66
Figura 39 - Fluxograma de Caracterização Mecânica	66
Figura 40 - Prensa UTM-25 utilizada para o ensaio de Módulo de Resiliência	67
Figura 41 - Equipamento utilizado para realização do ensaio de Resistência a Tração ..	68
Figura 42 - Subdivisões de regiões oriundas do ensaio de Flow Number	69
Figura 43 - Compressão diametral de corpos de prova cilíndricos	70
Figura 44 - Mistura asfáltica convencional	72
Figura 45 - Mistura asfáltica colorida	72
Figura 46 - Corpos de Prova com 9kg	73
Figura 47 - Placas medindo 12x12 cm	73
Figura 48 - Placa para medir a refletância e a temperatura superficial (cor preta)	74
Figura 49 - Placa para medir a refletância e temperatura superficial (cor amarela)	74
Figura 50 - Placa para medir a refletância e temperatura superficial (cor vermelha)	74
Figura 51 - Termômetro laser digital infravermelho	75
Figura 52 - Medidor de Radiação de Energia Solar	76
Figura 53 - DRX dos pigmentos Vermelho e Amarelo	51
Figura 54 - Resultados do ensaio de Resistência à Tração	77
Figura 55 - Resultados do ensaio de Módulo de Resiliência	79
Figura 56 - Resultados da Relação da Resistência Retida à Tração	80
Figura 57 - Resultados do ensaio de Flow Number	82
Figura 58 - Curvas mestras de todas as misturas asfálticas avaliadas	84
Figura 59 - Módulo dinâmico das misturas asfálticas (4,4°C)	85
Figura 60 - Módulo dinâmico das misturas asfálticas (21,1°C)	85
Figura 61 - Módulo dinâmico das misturas asfálticas (37,8°C)	86
Figura 62 - Ângulos de fase relativos às frequências de carregamento (4,4°C)	87
Figura 63 - Ângulos de fase relativos às frequências de carregamento (21,1°C)	87
Figura 64 - Ângulos de fase relativos às frequências de carregamento (37,8°C)	88
Figura 65 - Curva de fadiga em função da diferença de tensões	89

Figura 66 - Curvas de fadiga em função da deformação resiliente específica.	91
Figura 67 - Refletância solar das misturas asfálticas.....	93
Figura 68 - Temperatura das misturas asfálticas	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Normas dos ensaios de caracterização física das amostras de CAP.....	45
Tabela 2 - Ensaios e normas utilizadas para caracterização dos agregados	47
Tabela 3 - Granulometria dos agregados	48
Tabela 4 - Resultados do ensaio de massa específica com agregados graúdos e miúdos	49
Tabela 5 - Resultados do ensaio Equivalente areia	49
Tabela 6 - Resultado do ensaio de Los Angeles	50
Tabela 7 - Normas dos ensaios de caracterização física do ligante.....	52
Tabela 8 - Penetração retida do CAP 50/70	53
Tabela 9 - Variação do ponto de amolecimento do CAP 50/70	55
Tabela 10 - Viscosidade rotacional do CAP 50/70.....	56
Tabela 11 - Temperaturas de Usinagem e Compactação do CAP 50/70.....	57
Tabela 12 - Proporções dos agregados nas granulometrias	59
Tabela 13 - Resumo da compactação das misturas asfálticas	63
Tabela 14 - Critérios volumétricos para cada teor de ligante	64
Tabela 15 - Resumo dos parâmetros volumétricos para o teor de CAP de 5,10%	65
Tabela 16 - Flow Number mínimo requerido pela NCHRP 09-33.....	82
Tabela 17 - Valores mínimos de Flow Number segundo Nascimento (2008)	83
Tabela 18 - Modelo de fadiga em função da diferença de tensões.....	89
Tabela 19 - Variação da vida de fadiga com o nível de diferença de tensões aplicado .	90
Tabela 20 - Modelo de fadiga em função da deformação resiliente específica.....	91
Tabela 21 - Variação da vida de fadiga com o nível de deformação resiliente.....	91
Tabela 22 - Resumo dos valores de Albedo das misturas asfálticas	92

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

°C	Celsius
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASTM	American Society for Testing Materials
BRT	<i>Bus Rapid Transit</i>
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CCP	Concreto de Cimento Portland
Cm	Centímetro
CNT	Confederação Nacional dos Transportes
Cp	Centipoise
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DRX	Difração de Raio-X
ESALs	Equivalent Single Axle Load
Fe ₂ O ₃	Hematita
FeO(OH)	Goethita
FN	Flow Number
G	Gramas
GI	Massa específica do ligante
Gmm	Massa específica máxima
HMA	Hot Mix Asphalt
Hz	Hertz
ICU	Ilha de Calor Urbana
Kg	Quilograma
Km	Quilômetro
Kpa	Quilopascal
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentação
M	Metro
Mag	Massa do agregado
Min	Minuto
Mm	Milímetro
Mpa	Megapascal
MR	Módulo de Resiliência
ONUBR	Organização das Nações Unidas no Brasil
P _{ag}	Percentual de agregado na mistura
P _l	Teor de ligante
P _{li}	Teor de ligante inicial
PMQ	Pré-Misturado a Quente
RPBC	Refinaria Presidente Bernardes em Cubatão

Rpm	Rotação por minuto
RRT	Resistência Retida à Tração
RT	Resistência a Tração Indireta por Compressão Diametral
RTFO	Rolling Thin Film Oven Test
S	Segundo
SHRP	Strategic Highway Research Program
SMA	Stone Mástique Asphalt
TC	Temperatura de Compactação
TU	Temperatura de Usinagem
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
VAM	Vazios no agregado mineral
V_{la}	Volume de ligante absorvido
V_{le}	Volume de ligante efetivo
V_v	Volume de vazios

Sumário

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Objetivos	21
1.1.1	Objetivo Geral	21
1.1.2	Objetivos Específicos	21
1.2	Justificativa	22
1.3	Organização do trabalho	23
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
2.1	Pavimentação asfáltica.....	24
2.1.1	Camadas	25
2.1.2	Pavimentação Asfáltica no Brasil.....	27
2.2	Ilhas de calor urbano.....	28
2.3	Albedo.....	32
2.3.1	Métodos para Medição da Radiação Solar	33
2.4	Asfalto colorido	35
2.5	Óxido de ferro	38
2.5.1	Magnetita - Fe_3O_4	38
2.5.2	Hematita - Fe_2O_3	39
2.5.3	Goethita – $FeO(OH)$	40
2.6	Uso do Óxido de Ferro na construção civil	41
2.7	Considerações Finais	43
3	MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1	Caracterização física dos materiais	44
3.2	Materiais	45
3.2.1	Ligante Asfáltico	45

3.2.2	Agregados.....	46
3.2.3	Óxido de Ferro.....	46
3.3	Métodos	47
3.3.1	Propriedades físicas dos materiais.....	47
3.3.2	Caracterização do Óxido de Ferro.....	50
3.3.3	Caracterização do Cimento Asfáltico de Petróleo.....	51
3.4	Dosagem SUPERPAVE	58
3.5	Caracterização Mecânica dos materiais.....	65
3.5.1	Módulo de Resiliência.....	66
3.5.2	Resistência à Tração Indireta por Compressão Diametral.....	67
3.5.3	Ensaio de Lottman Modificado	68
3.5.4	Deformação Permanente (Flow Number).....	68
3.5.5	Vida de Fadiga.....	69
3.6	Temperatura superficial e quantidade de refletância (Albedo) das placas	71
3.6.1	Fabricação das placas	71
3.6.2	Medição da temperatura superficial	74
3.6.3	Medição da refletância.....	75
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	77
4.1	Caracterização mecânica das misturas asfálticas.....	77
4.1.1	Ensaio de Resistencia a Tração	77
4.1.2	Ensaio de Módulo de Resiliência	78
4.1.3	Lottman Modificado - Ensaio de dano por umidade induzida	80
4.1.4	Ensaio de Flow Number	81
4.1.5	Ensaio de Módulo Dinâmico	83
4.1.6	Ensaio de Fadiga.....	88
4.2	Avaliação da refletância das misturas asfálticas.....	92
4.3	Análise da Temperatura dos Revestimentos	94

5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	96
5.1	Sugestões para pesquisas futuras	97
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98

1 INTRODUÇÃO

O crescente desenvolvimento das cidades ou centros urbanos gerados pelo aumento gradativo populacional e atrelado ao avanço da globalização têm sido uma das principais responsáveis pelas alterações que ocorrem no meio ambiente, assim como, pela geração de mudanças fisionômicas no planeta. Segundo a ONUBR (Organização das Nações Unidas no Brasil), metade da população mundial vive em áreas urbanas, e a estimativa aponta que, até o ano de 2050, mais de 70% da população mundial estará vivendo em cidades.

Este crescimento urbano excessivo e sem planejamento resultou em implicações indesejáveis em todo o mundo, dentre estas, o aumento da temperatura do meio ambiente tem gerado bastante preocupação para população como um todo, por ser este o principal causador do fenômeno conhecido como Ilha de Calor Urbano (ICU), caracterizado pelo incremento das temperaturas urbanas em comparação com as áreas rurais, pode-se dizer então que é um fenômeno associado ao acúmulo, de grandes quantidades de calor devido à absorção da radiação solar durante o dia (DEL CARPIO, 2014).

Muitos são os fatores responsáveis por esse aumento excessivo da temperatura nos centros urbanos, porém, apresenta-se como mais significativos a escassez de vegetação, predominante nas zonas rurais e o uso de materiais que possuem baixa refletividade, como é o caso da pavimentação asfáltica, que é justamente a substituição do terreno natural por materiais artificiais (MIRZAEI e HAGHIGHAT, 2010).

Grande parte dos centros urbanos são constituídos por vias asfaltadas, as quais são marcadas pela alta absorção solar, baixa permeabilidade e propriedades térmicas favoráveis para que se obtenha um acúmulo de energia e irradiação de calor, o que acaba acarretando no incremento considerável da temperatura dessas localidades (FEITOSA, 2015).

De acordo com o estabelecido por Lombardo (1985) o aumento da poluição e da quantidade de calor emitido nos centros urbanos, juntamente com a falta de mecanismos de controle sobre estas alterações torna-se um agravante tanto para o meio ambiente, quanto para a população em geral, pois originam diversas modificações ambientais, incluindo danos à saúde, ao conforto térmico e à economia da população.

Para Werneck (2018), essas modificações ambientais têm como principal consequência o incremento da temperatura dos centros urbanos principalmente quando comparadas às áreas rurais circundantes, a aglutinação de pessoas em áreas urbanas e o

decorrente revestimento do terreno natural por materiais artificiais favorecem esse aumento de intensidade e frequência de temperatura.

São reflexo da construção de prédios e pavimentação das ruas, ocasionando numa maior absorção da radiação solar nas superfícies urbanas do que o solo do terreno natural ainda composto por vegetação. Para tanto, a falta de áreas verdes impede que as cidades liberem o excesso de calor por meio da evaporação e da transpiração das árvores (FIORAVANTI e LOPES, 2017).

Esse fenômeno apresenta como principais consequências, o desconforto térmico, o crescimento do consumo de energia para refrigeração de ambientes, a concepção de poluentes atmosféricos e, inclusive, o agravante a saúde de grupos de pessoas sensíveis às mudanças térmicas (ASHIE, 2008).

É sabido que, aumentando-se a poluição e a quantidade de calor emitido nos centros urbanos, ocorre um aumento excessivo do uso do ar-condicionado, com o intuito de minimizar essa sensação de desconforto térmico, o que acaba acarretando numa condição desfavorável, tanto para o meio ambiente quanto para população em geral, pois são esses agravantes que provocam diversas doenças respiratórias, infecciosas e alérgicas para grande parcela da população principalmente crianças e idosos os quais são os grupos mais suscetíveis à variação térmica por causa da baixa capacidade de manter a temperatura corporal. (BARCELLOS, 2009).

Portanto, verifica-se que, o aumento excessivo do calor nas áreas urbanas se deve a diversos fatores que colaboram de forma direta ou indireta, entretanto, o uso de materiais com baixa refletividade e a deficiência de áreas verdes são os aspectos mais significativos. Com isso, estão surgindo novas tecnologias com o intuito de minimizar os efeitos que tais materiais causam ao meio ambiente, uma das técnicas utilizadas consiste no uso de materiais mais refletivos (MIRZAEI e HAGHIGHAT, 2010).

Nesta perspectiva é que surge a prática mais utilizada para suavizar os efeitos da ICU, apresentada por Rosenfeld (1998). O qual relata que, esta alternativa se refere a mudança da cor das superfícies asfálticas escuras para cores mais claras, que sejam capazes de refletir de fato a luz solar, tanto a visível como a invisível (geralmente a infravermelha).

Essa mudança da cor das superfícies urbanas pode ser obtida com uso de pigmentos coloridos com o intuito principal de aumentar o valor do albedo da mistura asfáltica, ou seja, aumentar o quantitativo da refletividade solar total de uma superfície. Com isso,

almeja-se diminuir a temperatura do ar, adiar a formação do ozônio troposférico, assim como mitigar o fenômeno da ICU que é o foco principal nesse caso.

Em estudos realizados por Trichês (2014), as misturas coloridas atingiram uma refletância de 73%, valor quase dobrado de uma mistura asfáltica convencional. Os principais motivos para o uso cada vez mais recorrente e acentuado dos corantes utilizados nas misturas asfálticas são de caráter econômico e socioambientais, objetivando reduzir a emissão de gases formadores do efeito estufa e dos diversos danos provocados ao meio ambiente através do surgimento das ilhas de calor urbano.

Atrelado a tudo isso, ainda tem-se que o uso do asfalto colorido considerado mais resistente que o convencional, surgiu também devido a necessidade de aumentar a vida útil das superfícies asfálticas das rodovias, as quais sofrem graves deteriorações devido a danos cotidianos causados pela ação de chuvas fortes e o tráfego contínuo de veículos, visto que, a adição de pigmentos nas misturas asfálticas gera um aumento favorável na resistência mecânica dessas misturas (DEL CARPIO, 2014).

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo central o uso de corantes nas misturas asfálticas, principalmente, para serem utilizados em revestimentos asfálticos urbanístico de vias que requeiram maior visibilidade e diferenciação de piso, com a intenção de aumentar a refletividade asfáltica, diminuindo dessa forma, as grandes quantidades de calor resultantes da absorção da radiação solar.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Estudar a utilização de óxido ferro para produção de misturas asfálticas coloridas e analisar o efeito da incorporação desses corantes na mitigação das ilhas de calor urbano e no desempenho mecânico de misturas asfálticas.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Verificar possíveis vantagens da utilização do óxido de ferro em misturas asfálticas como sintetizador do acúmulo de temperaturas nas vias asfálticas.
- Comparar o comportamento térmico das misturas asfálticas convencionais e coloridas.

- Verificar as propriedades mecânicas da mistura asfáltica produzida com a incorporação do corante em questão.
- Comprovar que o uso de pigmentos de Óxido de Ferro incorporados as misturas melhoram a reflexão efetiva da luz solar.

1.2 Justificativa

A preocupação com o meio ambiente tem se mostrado cada vez mais evidente tanto nos países desenvolvidos quanto nos que estão em crescente desenvolvimento. É sabido também, que pelo menos nos últimos 50 anos a atividade humana é uma das principais causas do aquecimento global, juntamente, com o acúmulo de gases do efeito estufa (FEITOSA,2015).

Para tanto, a ideia é fazer com que se potencialize a redução da emissão de gases nocivos ao meio ambiente, ocasionados pelo aumento brusco da temperatura ambiental, ou seja, utilizar de novas tecnologias e materiais que possam contribuir de alguma forma para a resolução dessas questões ambientais.

Uma das principais causas relativas a esse aumento de temperatura pode estar ligada a escassez de vegetação dos centros urbanos, ocasionado pela ação recorrente dos seres humanos e aumento efetivo da população nas cidades, gerando um desenvolvimento das construções e a substituição recorrente do terreno natural por materiais artificiais, que são as superfícies asfaltadas, as quais absorvem grandes quantidades de calor, devido a sua cor escura.

Visando garantir um maior bem-estar e condições favoráveis de vida a população tanto atual quanto futura, busca-se amenizar o acúmulo de grandes quantidades de calor as superfícies asfaltadas devido à absorção da radiação solar durante o dia, reduzindo assim, conseqüentemente o incremento das temperaturas urbanas.

Dessa forma explica-se então a escolha por métodos e novas tecnologias em misturas asfálticas, que objetivam a redução desses efeitos causadores das chamadas ilhas de calor urbano, a melhoria na qualidade do pavimento, prezando sempre por durabilidade e segurança para os usuários.

A utilização desses métodos ou materiais aplicados as misturas asfálticas, objetiva-se, portanto, em favorecer a segurança viária e engenharia de tráfego satisfatória, tendo em vista, que trata-se de um revestimento resistente a altas temperaturas e à ação dos raios ultravioletas. A pavimentação com asfalto colorido é ideal para ser aplicada em

vias especiais que necessitem de maior visibilidade e diferenciação de piso e tem como objetivo principal, o aumento do albedo, que se traduz no aumento da refletividade das superfícies asfálticas.

1.3 Organização do trabalho

Esta dissertação é composta de seis capítulos, serão expostos a seguir uma rápida descrição da temática abordada em cada um deles.

- Capítulo 1 – Constituído pela introdução, contendo os objetivos que se pretende alcançar através do estudo realizado, justificativa e presente tópico, que expõe toda a organização do trabalho.
- Capítulo 2 – Nesse capítulo consta a fundamentação teórica, na qual são apresentados os assuntos de grande importância para o desenvolvimento do trabalho em questão, tais como: pavimentação, ligantes asfálticos puros e modificados, Ilhas de Calor Urbana, asfalto colorido e óxido de ferro.
- Capítulo 3 - São descritos todos os materiais utilizados na pesquisa, bem como os procedimentos experimentais adotados para o desenvolvimento desta dissertação.
- Capítulo 4 - São explanados os resultados e as discussões dos ensaios físicos e mecânicos dos materiais estudados.
- Capítulo 5 – São exibidas as conclusões que foram obtidas neste trabalho a partir dos objetivos pretendidos na pesquisa em questão, assim como, sugestões para trabalhos futuros.
- Capítulo 6 – São apresentadas as referências bibliográficas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

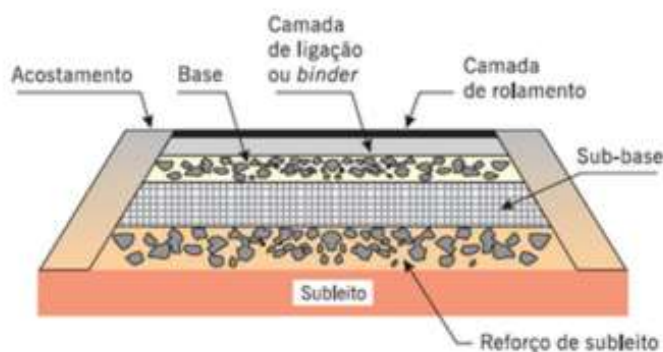
2.1 Pavimentação asfáltica

Pavimento é toda a estrutura que deverá resistir a esforços verticais devido a passagem de veículos e horizontais existentes no pavimento, denominados de sollicitação, e para isto deve-se buscar maior durabilidade possível para estas vias. Portanto, segundo definição apresentada pelo DNIT, 2006 (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes), pavimento pode ser explicado como uma superestrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentadas sobre o terreno de fundação preparado para receber o pavimento, o qual é designado de subleito.

Existem 3 tipos de pavimentos, são eles flexível, rígido e semirrígido, e podem ser diferenciados pela distribuição da carga recebida pelo volume do tráfego para o subleito da estrutura.

Bernucci et al (2007), afirma que a maioria dos pavimentos brasileiros são do tipo flexíveis, compostos por uma fina camada de revestimento asfáltico, que, em função do tráfego e do terreno natural, apresentam as camadas de base, sub-base e reforço do subleito. Normalmente são constituídos de revestimento betuminoso delgado sobre camadas puramente granulares (Figura 1). Uma das camadas que formam este tipo de pavimento é a camada de revestimento, constituída por uma mistura de agregados minerais graúdos e miúdos e ligante asfáltico, assegurando a esse revestimento características adequadas de impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à fadiga, levando-se sempre em consideração o clima e o tipo de tráfego existente.

Figura 1 - Estrutura de um pavimento flexível

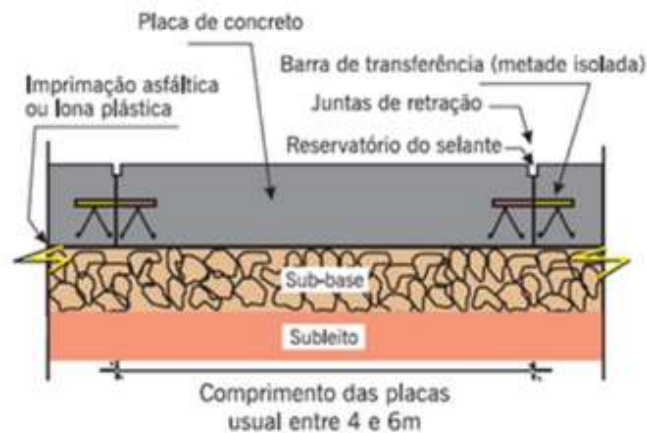


Fonte: <http://www.sptsondagens.com.br/servicos?servico=dimensionamento>

Já o pavimento rígido, é bastante resistente e por isso, pode apresentar ou não uma camada de sub-base entre o revestimento e o subleito, isso vai depender da qualidade do

material do subleito (Figura 2). É o pavimento em que uma camada absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento horizontal aplicado, aliviando dessa forma os esforços verticais, os quais ficam bem distribuídos nas camadas subjacentes (BALBO, 2007).

Figura 2 - Estrutura de pavimento rígido



Fonte: <http://www.sptsondagens.com.br/servicos?servico=dimensionamento>

Ainda temos o tipo semirrígido (Figura 3), que segundo Balbo (2007), trata-se de um revestimento asfáltico com base ou sub-base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias de elevada rigidez.

Figura 3 - Estrutura de pavimento semirrígido



Fonte: <http://www.ecivilnet.com/dicionario/o-que-e-pavimento-semi-rigido.html>

2.1.1 Camadas

A NBR 7207/82 declara a constituição do pavimento a partir de quatro camadas: subleito, sub-base, base e revestimento.

Para Balbo (2007), o subleito é a camada que funciona como fundação do sistema de pavimentação. É esta camada que irá receber os esforços absorvidos pelo pavimento, quando necessário, faz-se um reforço do subleito. Acima dessa camada vão estar alocadas todas as demais que compõem a estrutura pavimentada, são elas, camadas de sub-base, base e revestimento.

Silva (2008) em seus estudos apresenta os conceitos e materiais empregados na fabricação de tais camadas:

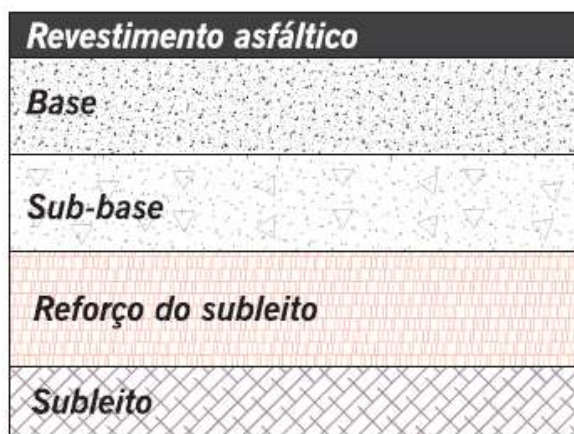
Sub-base é tida como camada corretiva do subleito, ou complementar à base, quando não for possível construir o pavimento sobre o próprio leito obtido na terraplenagem. Podem ser realizadas utilizando-se os seguintes materiais: cascalho, solo-cal, solo-cimento.

Base é a camada que tem por função aliviar a tensão nas camadas inferiores, permitir a drenagem das águas que se infiltram no pavimento e resistir às tensões e deformações atuantes. Essa camada deve ser muito bem construída e com material de excelente qualidade, os materiais que podem ser empregados como base são a brita graduada simples, concreto compactado a rolo, brita graduada tratada com cimento, macadames hidráulico e seco, entre outros.

E por fim, a camada de revestimento, a qual recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos, com função de melhorar as condições de rolamento e resistir aos esforços que nele atuam. Para esta camada podem ser utilizados os seguintes materiais, Concreto de Cimento Portland (CCP) ou Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) ou Stone Masticue Asphalt (SMA), para tráfego pesado, e o PMF (Pré-Misturado a Frio), para tráfego leve.

Como visto, cada uma dessas camadas possui uma ou mais funções específicas, e tem como objetivo favorecer de forma adequada condições de rolamento e suporte. A figura a seguir, (Figura 4), mostra uma estrutura de pavimento, contendo as camadas anteriormente descritas.

Figura 4 - Estrutura de pavimento



Fonte: Bernucci et al. 2007.

2.1.2 Pavimentação Asfáltica no Brasil

Responsável pela movimentação de pessoas e mercadorias, o setor de transportes é um dos principais agentes indutores de crescimento econômico do País. O modal rodoviário é o principal meio de escoamento de produção e deslocamento de pessoas no Brasil.

De acordo com o DNIT 2018, apesar de a maior parte da carga que abastece o País ser transportada pelas rodovias, apenas 13% são pavimentadas, o restante, ou seja, 87% das rodovias não apresentam nenhum tipo de pavimentação.

Pesquisa realizada pela Confederação Nacional dos Transportes – CNT em 2018, demonstra que grande parte das cidades brasileiras, apresentam mais da metade de sua malha viária não pavimentada, isso se deve à falta de recursos necessários para a execução das obras de pavimentação.

Ainda em Pesquisa CNT de Rodovias 2018 a classificação das rodovias no que diz respeito à situação geral, aponta que a malha pavimentada brasileira continua em condições insatisfatórias, ainda que tenha apresentado uma pequena melhora entre 2017 e 2018, revela ainda que 57% dos trechos avaliados apresentaram estado geral com classificação regular, ruim ou péssima. Esses dados preconizam que, a existência de um pavimento danificado, além de impactar diretamente nos custos operacionais, também é uma das causas de acidentes.

2.1.2.1 Breve Histórico da Pavimentação Asfáltica no Brasil

Foi nos anos 50 que o Brasil iniciou de fato o revestimento das vias revestidas com material betuminoso, isso graças à instalação da primeira refinaria de petróleo, aprovada em 1953, por Getúlio Vargas, a Refinaria Presidente Bernardes em Cubatão/SP (RPBC).

Anteriormente, as poucas rodovias pavimentadas com material betuminoso eram construídas com asfaltos importados do tipo natural. As técnicas usadas na época se limitavam ao macadame betuminoso e ao tratamento superficial (ZAGONEL, 2013).

Em 1956, quando a RPBC passou a produzir o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), o qual era transportado a granel em carretas tanque, iniciou-se uma nova fase da pavimentação com a técnica do CBUQ. Em sequência, no ano de 1959, o mercado brasileiro fabricou, a primeira usina de CBUQ, a qual foi instalada na cidade Caxias do Sul/RS. Foi então, a partir desta data que o CBUQ, passou a ter a hegemonia nas técnicas de pavimentação do País.

Segundo Zagonel (2013), a partir dos anos 90, com o início das privatizações, que as empresas concessionárias, aliadas aos distribuidores de asfaltos, investiram em pesquisa para modificação de asfaltos e introdução de novas técnicas já consagradas no exterior, priorizando os custos.

Com relação aos países desenvolvidos, o Brasil apresenta um tardio crescimento da malha pavimentada, no entanto, apesar de ainda possuir uma baixa porcentagem de rodovias pavimentadas, o País tem demonstrado um crescimento médio de tráfego de veículos nas estradas de 3% ao ano, chegando até a 6% em algumas regiões. Portanto, pode-se dizer que nos últimos anos o País voltou a apresentar grande impacto tanto na ampliação da extensão de vias pavimentadas, como em duplicações e melhorias dos serviços de manutenção de forma geral (SILVA, 2011).

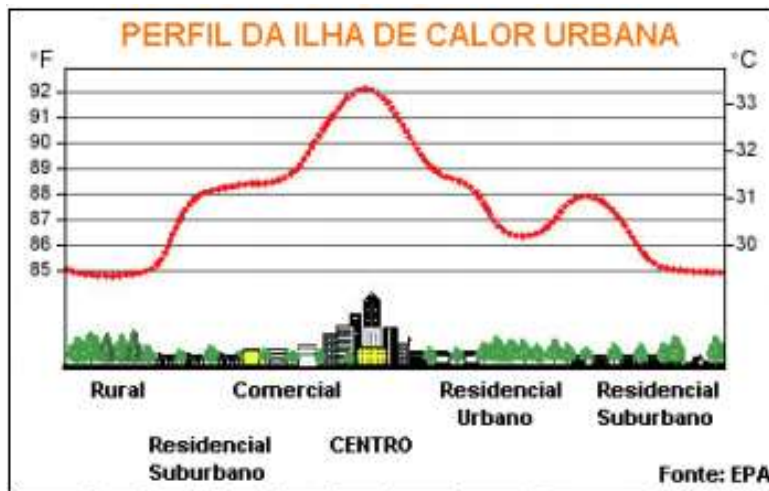
2.2 Ilhas de calor urbano

Conforme Lucena (2005) ilha de calor urbana pode ser entendida como o aumento da temperatura do ar das áreas urbanas em comparação as áreas não urbanizadas, isso pode se dar devido a interferência das atividades humanas sobre as superfícies, assim como a minimização do quantitativo de arborização existente na área urbana.

Bias *et al*, (2003) cita que a Lei de Plank, diz que, quanto maior a temperatura para um dado comprimento de onda, maior será a quantidade de energia emitida por um corpo negro. Ele afirma ainda que esses padrões distintos de emissão de calor acabam ocasionando uma temperatura mais elevada no centro urbano e, à medida que se afasta

deste, em direção aos subúrbios, essas temperaturas tendem a diminuir, conforme apresentado na (Figura 5).

Figura 5 - Perfil da ilha de calor urbana



Fonte: <https://sustentarqui.com.br/o-que-sao-ilhas-de-calor/>

A análise da figura, permite uma visualização direta do aumento de temperatura dos centros urbanos pouco arborizados, com o terreno revestido por material artificial e o aumento gradativo de prédios e construções de grande porte, enquanto que na zona rural, essa temperatura tem um decréscimo de pouco mais de 3° C decorrente de arborização predominante, existência de terreno natural e um mínimo possível de construções civis, acarretando em um ambiente mais livre poluição, emissão de gases e aumento na quantidade de calor, fatores esses responsáveis pelos diversos impactos ambientais.

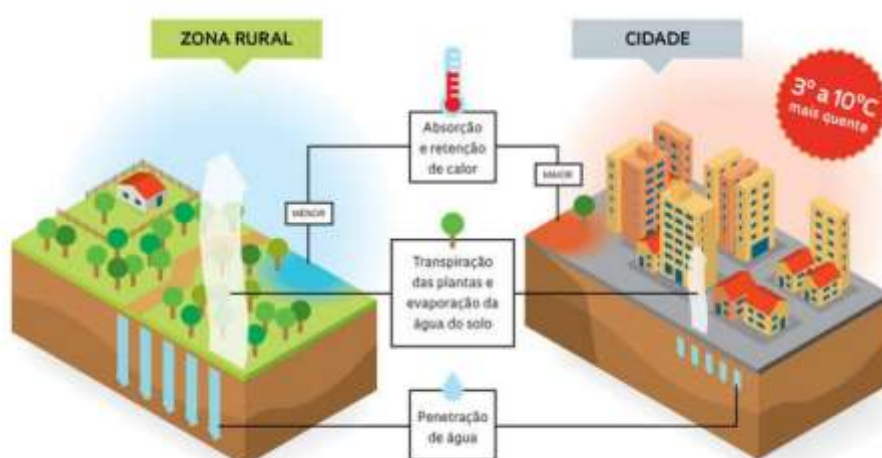
Pode-se dizer ainda que esse comparativo possui relação direta com a utilização das propriedades térmicas dos materiais das construções urbanas, as quais facilitam a condução de calor mais rapidamente que o solo e a vegetação das áreas rurais, contribuindo para uma elevação na diferença de temperatura entre essas regiões.

Sabe-se que as alterações ambientais são reflexos diretos na qualidade de vida da população, uma vez que, o aumento da poluição e da quantidade de calor emitido nos centros urbanos, dará origem a diversos impactos ambientais, resultando diretamente em danos provocados à saúde, ao conforto térmico e à economia da população. Tudo isso, atrelado ao crescimento desenfreado das cidades, tem se tornado um problema que vem se agravando com o passar dos dias.

Fialho (2012) destaca como causa principal para o fenômeno de ilha de calor, às atividades humanas sobre a superfície na qual, a vegetação tem sido substituída pelas superfícies artificiais.

Existe uma relação direta entre o crescimento urbano e o aumento da intensidade das ilhas de calor. Isso pode ser explicado pelo fato de que os materiais utilizados na construção civil armazenam elevada quantidade de calor (Figura 6), bem como, áreas mais povoadas e menos arborizadas tendem a apresentar temperaturas mais elevadas.

Figura 6 - Efeito da Ilha de Calor Urbana – Cidade X Zona Rural



Fonte: <http://revistapesquisa.fapesp.br/2012/10/11/ilha-de-calor-na-amazonia/>

A edificação das cidades altera de forma radical o padrão de ocupação do solo, pois no lugar da terra exposta, da grama e das árvores, elementos rurais que amenizam as altas temperaturas tanto a nível do solo como do ar, uma substituição por materiais artificiais impermeáveis e que retêm grande parte do calor. No campo, a presença de vegetação arbórea e rasteira cria zonas de sombra capazes de reduzir a temperatura do solo e refrescam o clima de um lugar por meio da evapotranspiração, mecanismo que faz as plantas e o solo liberarem água para o ar como forma de dissipar o calor do ambiente.

Na área urbana, tudo que torna o clima do campo mais ameno é escasso ou está ausente. A água das chuvas quase não penetra no solo, há menos umidade localmente e o processo de evapotranspiração é menos intenso. De uma forma geral, a área urbana é comprometida pela ação antrópica, no intuito de satisfazer necessidades, com seus prédios altos e construções com texturas diferentes da superfície do meio rural, o que pode alterar também o regime de ventos e intensificar a sensação de calor.

Em estudos realizados por Oliveira (2012), na cidade de Presidente Prudente, com uma população de 207 mil habitantes, foram registradas diferenças de até 8°C entre as áreas mais urbanizadas e o meio rural, sobretudo à noite. O mesmo autor, afirma ainda que, o uso de materiais inadequados nas edificações, a elevada densidade da área construída e a escassez de áreas verdes intensificam as ilhas de calor, o que também constitui um problema de saúde pública e predispõe a ocorrência de doenças respiratórias e circulatórias em idosos e crianças principalmente.

Em zonas urbanas densamente povoadas como São Paulo e New York o efeito ilha de calor pode atingir uma diferença de até 12°C na temperatura do ar entre uma área urbana e uma zona rural ou de mata, e se o valor comparado for medido através do solo, essa diferença tende a ser ainda maior (OLIVEIRA,2012).

Pode-se relatar, portanto que, a principal causa para formação das ICU refere-se a interferência da cidade e seus processos no oscilação de energia da superfície terrestre, especialmente o aumento da absorção de energia solar, sob forma de calor, na área urbana comparada ao espaço rural que a circunda, e também maior geração de calor motivado pela incessante atividade humana (OKE, 2002).

Ultimamente, a preocupação com o meio ambiente tem aumentado cada vez mais, e o setor rodoviário tem tentado seguir esta mesma tendência, desenvolvendo novas tecnologias no campo da pavimentação com o objetivo de contribuir neste aspecto.

Estratégias são estudadas para a mitigação dos efeitos causadores das Ilhas de Calor Urbano, e é sabido portanto que, o uso extensivo de materiais de alto albedo (ou de alta refletância), são capazes de obter resultados bastante satisfatórios, levando-se em consideração que, esses materiais atingem um maior índice de radiação solar, e estão predispostos a absorverem uma menor quantidade de energia, portanto, conseqüentemente evidenciam significativas reduções na temperatura superficial (KRÜGER; GONZALEZ, 2016)

Estudos incentivam o uso de materiais capazes de reduzirem a temperatura não apenas em coberturas (Jacobson; Ten Hoeve, 2012), mas também em pavimentos (Carnielo; Zinzi, 2013), com o objetivo principal de diminuir a temperatura de superfície, obtendo dessa forma, um menor aquecimento do ar no plano do pedestre, reduzindo assim, o efeito de ICU.

O uso de tecnologias e métodos para incorporação de corantes às misturas asfálticas, que garantem uma redução na temperatura da superfície e aumentando a

refletância da mesma, tem sido bastante discutido por estudiosos no tema e levado em consideração quando a questão é reduzir consideravelmente as ilhas de calor urbano.

2.3 Albedo

Conceituado como a medida da quantidade de radiação que é absorvida e refletida pelo revestimento, ou seja, é uma medida quantitativa da refletividade solar total de uma superfície, pode-se dizer ainda que é estabelecida pela razão entre a luz solar refletida e a incidente (MARINOSKI et al, 2015). O albedo de superfícies urbanas está diretamente relacionado à sua capacidade de absorver energia ou refleti-la para as superfícies adjacentes, influenciando sobre as condições microclimáticas e de conforto térmico em nível do pedestre no espaço aberto.

Segundo Prata e Pezzuto, (2015) o albedo dos centros urbanos é consideravelmente menor em comparação com as zonas rurais circundantes, principalmente por causa da irregularidade da estrutura urbana e da utilização de materiais artificiais substituindo áreas verdes. Estes relatam ainda que a busca por um aumento do albedo urbano objetiva-se em reduzir as temperaturas ambientais, resultando em uma melhor qualidade do ar e redução dos custos de ar condicionado e para que essa redução aconteça é necessário a utilização de materiais reflexivos na pavimentação.

O aumento da população nos centros urbanos reflete diretamente em alterações das superfícies terrestres e no aumento das áreas edificadas e pavimentadas, em detrimento das áreas verdes resultando no aumento da absorção da radiação solar, portanto, as alterações na temperatura e no albedo das superfícies fazem referência ao tipo de cobertura da superfície, o que acarreta em variação no quantitativo e distribuição de calor ao meio ambiente (PAVÃO *et al*, 2015).

É notório que a cobertura das superfícies determina o clima de uma dada região, assim como, é esta também a responsável por controlar a quantidade de energia disponível para os processos de aquecimento da atmosfera e evapotranspiração (PILLAR, 1995). Portanto, se ocorre uma substituição do terreno natural por material artificial, ocorrerá conseqüentemente uma diminuição do albedo da superfície e modificação na distribuição de energia disponível (CARDOZO *et al.*, 2009).

Os métodos amplamente utilizados para medir a refletância solar dos materiais de cobertura (pavimentação) incluem padrões ASTM E903, o qual utiliza um equipamento chamado espectrômetro que possui uma esfera de integração para medir a refletância espectral solar de uma área de aproximadamente 0,1 cm², essa refletância é então

calculada através da irradiação espectral solar. Tem-se também o padrão C1549 que faz uso de um refletômetro para medir a refletância solar em uma área com aproximadamente 5 cm².

Os métodos E903 e C1549 são os mais adequados para medir a refletância solar de superfícies planas e homogêneas. Já o padrão E1918 usa um piranômetro para medir a refletância solar de um área de aproximadamente 10 m² e é melhor aplicado a superfícies grandes que também podem ser ásperas e não uniformes. A seguir serão demonstrados mais detalhadamente os principais equipamentos utilizado para medir a refletância solar de superficies asfálticas.

2.3.1 Métodos para Medição da Radiação Solar

2.3.1.1 Piranômetro

O piranômetro é um equipamento utilizado para medir a radiação global e difusa, bastante utilizado no ensaio de refletância solar, o qual é padronizado pela norma ASTM E 1918 06.

É frequentemente utilizado para medir radiação solar em uma superfície plana e projetado para medir a densidade de fluxo da radiação solar. Esse tipo de instrumento possui um disco de sombreamento com o objetivo de prevenir que a radiação solar direta atinja o sensor (Figura 7).

Figura 7- Piranômetro



2.3.1.2 Pirheliômetro

São instrumentos que medem a radiação direta (Figura 8), orientado de forma que a radiação direta do Sol é paralela ao eixo do tubo colimador.

Figura 8 - Pirheliômetro



2.3.1.3 Espectrofotômetro

Instrumento usado para medir a intensidade dos comprimentos de onda em um espectro de luz em comparação com a intensidade da luz de uma fonte padrão, ou seja, capaz de medir o brilho das várias porções de espectros (Figura 9). É comumente encontrado em muitos laboratórios de pesquisa e industriais.

A norma que padroniza o ensaio de refletância com uso da esfera integradora é a ASTM E903-96.

Para medir a refletância de um material, o espectrofotômetro emite um feixe de radiação que é separado por um seletor de comprimento de onda que isola o comprimento de onda desejado da fonte nos diversos comprimentos de onda. A radiação incide na esfera e é refletida pela amostra em todas as direções. A radiação refletida incide, por sua vez, nas paredes da esfera onde é multiplamente dispersa. Em seguida o detector dentro da esfera mede a quantidade de radiação dispersa dentro dela.

Figura 9 - Espectrofotômetro



2.3.1.4 Medidor de Radiação de Energia Solar

O medidor de energia solar é um instrumento compacto, resistente e preciso para medir a radiação solar em campo (Figura 10). O componente sensor de radiação solar empregado neste instrumento é um detector fotovoltaico de silício que possui alta estabilidade. É um instrumento de medição da energia solar com correção de cosseno total para o ângulo de incidência da radiação, e tem função de definição de hora e pode integrar a energia solar medida a cada segundo e calcular a energia média por hora automaticamente após o tempo desejado ser definido, para obter a média da energia solar radiada.

Figura 10 - Medidor de Radiação Solar – Power Meter



2.4 Asfalto colorido

É notório que coberturas asfálticas apresentam superfícies com temperaturas bastante elevadas, isso se deve principalmente à cor escura que o ligante asfáltico apresenta. Sob forma de calor, intensas quantidades de radiação solar são armazenadas pelo revestimento nas superfícies asfálticas (VILLENA *et al*, 2015).

Vários estudos relatam que uma das principais patologias verificadas nos pavimentos asfálticos é a deformação permanente em trilha de roda, causada na maioria das vezes pela deformação excessiva do revestimento e de forma ainda mais genérica em revestimentos submetidos a altas temperaturas (PROWELL E HURLEY, 2007).

Sabe-se então que, para se obter uma mistura asfáltica capaz de resistir à deformação permanente de forma mais eficiente, o ideal seria optar por um ligante que apresente uma alta rigidez a temperaturas elevadas ou pelo uso de um revestimento que atingisse temperaturas mais baixas que as usuais durante o dia.

Em busca da diminuição dessas temperaturas tanto superficiais, quanto no interior do revestimento, e incrementar nesse caso, a refletância solar ou o albedo como dito

anteriormente, surge como nova e eficaz tecnologia o uso de corantes nas misturas asfálticas, que possibilitam reduzir a quantidade de radiação solar absorvida pelo pavimento, diminuir a temperatura do ar e mitigar o fenômeno da ilha de calor urbano (TRICHÊS, 2014).

Pode-se dizer que, o asfalto colorido surgiu a partir da necessidade de aumentar a vida útil do selante asfáltico das rodovias, as quais sofrem graves deteriorações por causa das fortes chuvas, do excesso de peso nos veículos de transporte e tráfego diário pesado. O asfalto colorido é visto como mais resistente e está sendo adotado em algumas vias do país (MARINOSKI *et al*, 2015).

Uma das principais atribuições da pavimentação com asfalto colorido é a segurança viária e engenharia de tráfego proporcionada. O pavimento é ideal para ser aplicado em vias especiais como ciclovias, pistas de Cooper e atletismo, calçadas, parques, estacionamentos, condomínios, postos de combustíveis, helipontos, clubes de golfe, entre outras, unindo assim fatores funcionais e estéticos no que diz respeito ao design urbanístico e paisagístico, gerando uma integração mais harmoniosa com o ambiente (TRICHÊS, 2014).

Na cidade do Rio de Janeiro, por exemplo, a Estrada Dona Castorina, (Figura 11) no Mirante do Horto, foi a primeira a receber a aplicação do asfalto colorido. A cor escolhida foi o verde para que fosse possível fazer uma conexão com o ambiente da floresta.

Figura 11 - Trecho da estrada Dona Castorina, Rio de Janeiro



Fonte: Assessoria de Imprensa Betuseal (2016).

Coelho *et al*, (2010) relata em seus estudos que o revestimento asfáltico colorido é bastante resistente a altas temperaturas e à ação dos raios ultravioletas, além da vantagem

no que diz respeito a sua aplicação ser feita a uma temperatura abaixo de 140 graus, o que contribui para a redução da emissão de gases durante o processo, minimizando o risco de exposição para os trabalhadores e possui ainda uma vida útil de aproximadamente dez anos. Por se um material que absorve menos calor, este contribui para manter a pista sem ondulações, geralmente provocadas pelo excesso de tráfego. Uma outra atribuição da pavimentação com asfalto colorido é a segurança viária e engenharia de tráfego satisfatória, garantindo conforto e segurança para os usuários.

Desse modo, além de proporcionar beleza à obra, o uso da cor no pavimento asfáltico, em áreas com alta incidência de neblina ou em trechos de alto risco para os motoristas, essa coloração do pavimento pode ser útil para ajudar na visualização ou trazer a atenção do motorista para o perigo.

A Ilha do Fundão, localizada também no Rio de Janeiro, já possui um trecho de três mil metros pavimentado de amarelo. Segundo a Craft Engenharia, empresa responsável pela aplicação do asfalto colorido, este trabalho utilizou um asfalto especial aditivado e descolorido na mistura com o pigmento.

Figura 12 - Trecho da Ilha do Fundão, Rio de Janeiro.



Fonte: Assessoria de Imprensa Betuseal (2016).

A Prefeitura do Rio também está aplicando o asfalto vermelho para diferenciar os corredores do *Bus Rapid Transit* (BRT), com o objetivo de sinalizar vias especiais, como cicloviarias, corredores de ônibus, acostamentos e túneis, oferecendo maior segurança aos usuários.

Em alguns países como Espanha, França, Suíça, Inglaterra e Estados Unidos a aplicação de asfalto colorido já é bastante recorrente. Em Abu Dhabi o asfalto colorido é utilizado com o intuito de alertar a população sobre novos limites de velocidade em

algumas rodovias. O asfalto colorido juntamente com as placas, servem de alerta a população sobre os limites de velocidade. Segundo os idealizadores, em trechos definidos da estrada, um asfalto vermelho brilhante irá servir como um aviso de que o limite de velocidade foi alterado.

2.5 Óxido de ferro

São compostos químicos pulverulentos feito de ferro e oxigênio que ocorrem abundantemente de forma natural na crosta Terrestre. Considerado um grupo bastante significativo devido às suas propriedades magnéticas, elétricas, físico-químicas e morfológicas (MAGALHÃES, 2008).

Tremocoldi, (2003) afirma que estes compostos podem apresentar-se com estrutura cristalina definida ou como materiais amorfos e tem influência marcante nas características químicas e físicas do solo.

Os óxidos de Ferro possuem elevada superfície específica, o que resulta em alto poder de adsorção de ânions. São também ricos em micronutrientes e tem ação cimentante, o que confere a esse grupo de minerais, grande importância agrícola (MOTA et al., 2007).

Sabe-se ainda que estes, desempenham papéis fundamentais na indústria, cosméticos e arte, por esse motivo são tidos como os minerais mais produtivos e comuns na terra. Provém de um elemento metálico com símbolo químico Fe, que se transforma em óxido de ferro quando entra em contato com a água.

Esses compostos são altamente influenciados pela dinâmica da água no solo, visto que, a percolação da água promove a concentração de ácidos húmicos, o que favorece a formação de Goethita (FeOOH), já a formação de Hematita por exemplo, está relacionada a partes superiores do relevo, mais quentes e menos úmidas (MELO et al., 2001; GHIDIN et al., 2006).

A cor final e as especificações de cada tipo de Óxido de Ferro variam em conformidade com a intensidade de ferro e oxigênio. A seguir serão apresentados alguns dos tipos mais comuns desse composto.

2.5.1 Magnetita - Fe₃O₄

Óxido de ferro (III) ou óxido férrico, possui coloração preto-avermelhado, considerada uma espécie de ferrugem, é o composto químico de fórmula Fe₂O₃ (Figura 13). A magnetita é, um dos principais minerais de ferro. Considerada fortemente

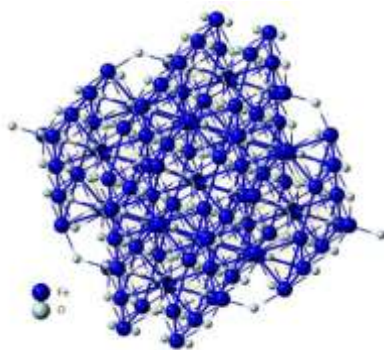
magnética, contém 72,4 % de F, é um mineral que se dissolve lentamente em ácido clorídrico, e está comumente mais associada a rochas metamórficas cristalinas (KLEIN, 2001).

O nome, magnetita faz referência a região onde a mesma era antigamente encontrada, que era a Magnésia uma região da Grécia, e que quer dizer "lugar das pedras mágicas". Pode ser conceituada como a fonte mais valiosa entre os minérios de ferro.

A magnetita pode ter composição variável nas temperaturas acima de 1000°C, devido ao fato que sua rede pode dissolver íons de oxigênio e possui propriedades paramagnéticas.

Suas propriedades magnéticas e elétricas são funções não apenas de seus raios iônicos e de valência, mas também, das propriedades químicas e morfológicas, estequiométricas e tamanhos de partícula (MAGALHÃES, 2008).

Figura 13 - Estrutura da magnetita, sistema cristalino isométrico



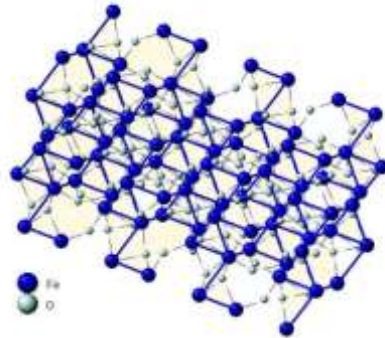
Fonte: Wechsler et al, 1984

2.5.2 Hematita - Fe₂O₃

O nome hematita vem do grego hemo sangue, fazendo alusão à cor vermelha, composto químico de fórmula Fe₂O₃, (Figura 14). Considerado como o principal mineral-minério de ferro, a hematita pode ocorrer sob diferentes formas, sendo elas, compacta, especular, porosa e hematita granoblástica (KLEIN, 2001).

A Hematita (Fe₂O₃), apesar de estar presente em menores quantidades que a Goethita, apresenta alto poder pigmentante, e uma amostra de solo com teor superior a 1,7% já impregna o solo de vermelho (TREMOCOLDI, 2003).

Figura 14 - Estrutura da Hematita, sistema cristalino hexagonal



Fonte: Blake et al, 1966

2.5.3 Goethita – FeO(OH)

Os óxidos de ferro aparecem principalmente sob a forma de Goethita (FeOOH), presente em quase todos os tipos de solos e regiões climáticas, possuem uma coloração amarelada e amarronzada nos solos. Possui alta superfície específica e também altos graus de substituição isomórfica em sua estrutura (DAS et al., 2011).

Cores vermelhas estão relacionadas com a presença de Hematita e indicam condições de boa drenagem e aeração de solo, enquanto que as amarelas, estão relacionadas com a presença da Goethita, e podem indicar condições de boa drenagem, porém com regime mais úmido (Figura 17).

Figura 15 – Hematita (vermelho), Goethita (amarelo)



Fonte: DAS et al, 2011

Os pigmentos de óxido de ferro disponíveis no mercado, ideais para a coloração de misturas betuminosas, são do fabricante LANXESS o qual apresenta pigmentos à base de óxido de ferro e de cromo. A linha tem como objetivo colorir materiais de construção convencionais, como concreto, telhas, placas de fibrocimento, asfalto, pisos intertravados e barreiras antirruído, são bastante resistentes ao calor e possuem alto poder de tingimento.

Os óxidos de ferro amarelo, marrom e preto também podem ser usados com betume claro. Entretanto, as restrições relacionadas com estabilidade ao calor devem ser observadas a temperaturas de mistura acima de 160°C-180 °C, que ocorrem na produção de mástique asfáltico.

Esse tipo de pigmento apresenta-se como uma estratégia mais segura que o selante asfáltico, uma espécie de revestimento (pintura), colocado por cima da pavimentação asfáltica, que apresenta como principal desvantagem a necessidade de manutenção frequente e o alto risco de acidente principalmente em período chuvoso, devido ao escorregamento que causa.

2.6 Uso do Óxido de Ferro na construção civil

Os pigmentos à base de óxido de ferro já eram utilizados desde a pré-história, quando povos primitivos pintavam seus desenhos em paredes de cavernas, o óxido de ferro dessas pinturas demonstra a altíssima resistência às intempéries, critério essencial para a avaliação de pigmentos (ASTRALL, 2017).

Pode-se dizer que o óxido de ferro é um composto amplamente utilizado na construção sob diversas formas, Murolo, (2007) destaca seu uso como película protetora ou proteção química, objetivando impedir o fenômeno da corrosão, envolvendo armaduras presentes no interior do concreto, em meio alcalino. Trata-se de uma fina camada bastante aderente ao aço delgado, composta por óxido de ferro, o qual é originado por reações de oxidação do ferro e redução do oxigênio presente na fase líquida dos poros do concreto.

Na construção civil a pintura representa uma operação de grande importância, e o óxido de ferro é também utilizado como componente na produção desses pigmentos. Para Anghinetti, (2012) existe um forte tendência em considerar a pintura uma operação de decoração, porém, além de decorar e proteger o substrato, a tinta pode oferecer melhor higienização dos ambientes, servindo também para sinalizar, identificar, isolar termicamente, controlar luminosidade e influenciar psicologicamente as pessoas através das sensações e efeitos que a mesma pode causar (Figura 15).

Figura 15 - Fachada de Concreto Colorido em Residência



Fonte: Know_How_Final_Ptlow_02.

Outra prática bastante comum, é o emprego de pigmentos em materiais cimentícios, principalmente em argamassas e concretos, visto que, a inserção desses pigmentos altera as propriedades do tempo de início e fim de pega, da consistência e resistência à compressão da pasta de cimento, demonstrado na figura abaixo (Figura 16), para grandes construções, as argamassas e o concreto colorido vem ganhando espaço, principalmente por questões sustentáveis. Presume-se, portanto, que essas adições são capazes de gerar resultados desejáveis para pastas de compósitos aplicadas em processos industriais de peças pré-moldadas (ALCANTARA, 2014).

Figura 16 - Ponte em Concreto Colorido



Fonte: Vibracom

2.7 Considerações Finais

O aumento desenfreado da população nas grandes cidades e a constante substituição do terreno natural por materiais artificiais tem levado ao aparecimento de um fenômeno denominado de Ilha de Calor Urbana, o qual se traduz no incremento das temperaturas das áreas urbanas. Preconiza-se, portanto, como uma das melhores opções para combater este fenômeno a utilização de métodos que visem aumentar a refletância solar dos revestimentos urbanos. Nesse caso, a utilização de pigmentos com cores mais claras a mistura asfáltica diminuindo a absorção de calor nos pavimentos tem se mostrado uma alternativa bastante eficaz.

Considerado mais seguro que o selante asfáltico, que é uma espécie de pintura, colocado por cima da pavimentação asfáltica, o qual apresenta como principal desvantagem a necessidade de manutenção frequente e o alto risco de acidente principalmente em período chuvoso, devido ao escorregamento que causa, a adição do óxido de ferro em misturas asfálticas traz consigo diversas vantagens, dentre elas destaca-se a elevada resistência à luz e a intempéries, o alto poder de tingimento, garantindo cores de longa duração em qualquer aplicação.

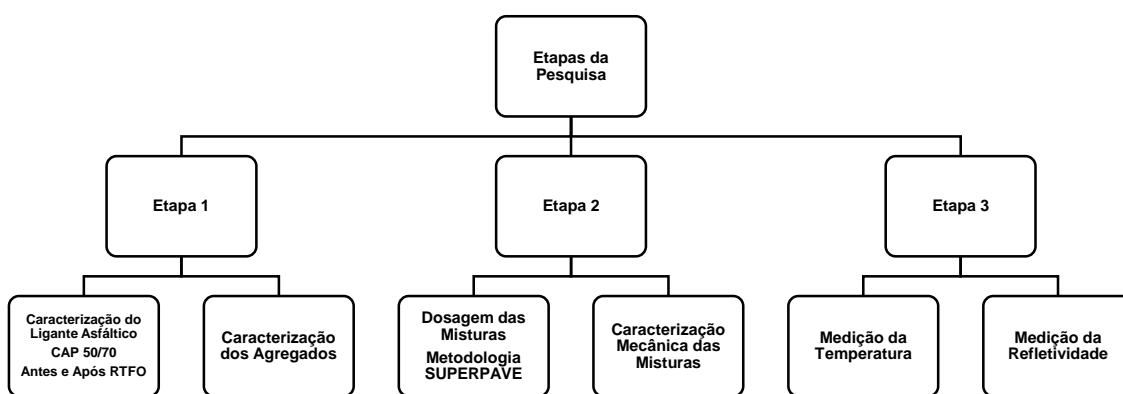
Além de tudo, o design urbanístico e paisagístico moderno faz uso da cor como um elemento estético, que busca favorecer a beleza das estradas e pavimentações urbanísticas. O asfalto colorido e o mástique asfáltico orientam o trânsito, mostram o caminho, designam zonas e decoram praças. Em tons leves ou fortes, combinam com o ambiente ao redor.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Serão descritos todo planejamento metodológico para a realização deste trabalho como: métodos e técnicas de investigação, tipo de pesquisa, instrumento de coleta e objetivos, assim como o programa experimental desenvolvido para a pesquisa.

A metodologia adotada para esta pesquisa foi dividida em três etapas conforme demonstra o fluxograma da figura a seguir, Figura 17. Foi realizada na primeira fase a caracterização com o CAP puro e posteriormente feita a incorporação de pigmentos de óxido de ferro a mistura.

Figura 17 – Etapas da Pesquisa

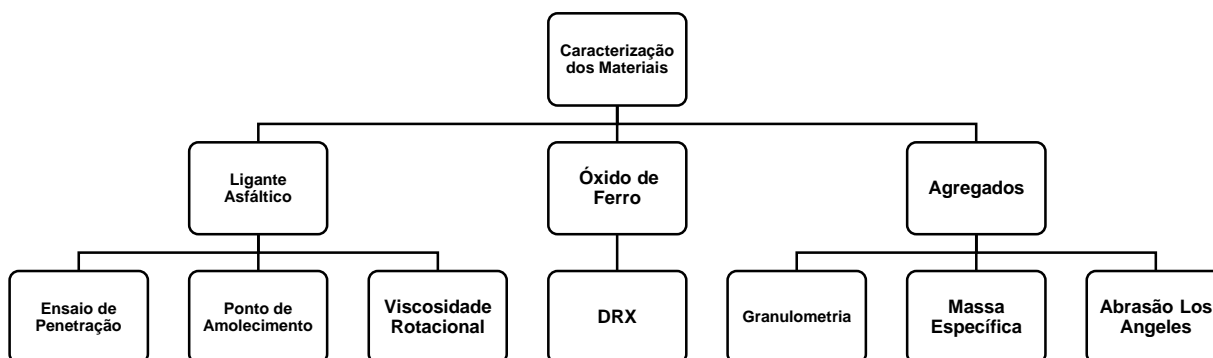


Foram produzidas mistura asfáltica modificadas as quais foram submetidas a ensaios mecânicos padronizados pelas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), da ASTM (American Society for Testing Materials), do Departamento de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e da American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).

3.1 Caracterização física dos materiais

Na Figura 18, é apresentado o esquema das atividades que foram realizadas para a caracterização dos materiais (CAP 50/70, agregados e corantes).

Figura 18 - Caracterização dos materiais



3.2 Materiais

3.2.1 Ligante Asfáltico

O ligante asfáltico (Figura 19) utilizado nesta pesquisa é o CAP 50/70, devido ser este o mais utilizado na região Nordeste. Foi fornecido pela empresa Rocha Cavalcante da cidade de Campina Grande.

Figura 19 - CAP 50/70



Na Tabela 1 estão dispostas as normas adotadas para a realização dos ensaios de caracterização do ligante asfáltico, CAP 50/70 através dos ensaios de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade rotacional.

Tabela 1 - Normas dos ensaios de caracterização física das amostras de CAP

Característica	Limites	Norma
Penetração(0,1mm)	50 -70	NBR-6576
Ponto de amolecimento (°C)	46 (mín.)	NBR-6560
Viscosidade Rotacional 135 °C (cp)	274 (mín.)	NBR-15184
Viscosidade Rotacional 150 °C (cp)	112 (mín.)	NBR-15184
Viscosidade Rotacional 177 °C (cp)	57 – 285	NBR-15184

3.2.2 Agregados

Os agregados utilizados foram, a brita 19mm, brita 9,5mm, pó de pedra ambos fornecidos pela empresa Rocha Cavalcante, a areia e cal hidratada, adquiridos no mercado local (Figura 20).

Figura 20 - Agregados: areia, pó de pedra, brita 12.5mm e brita 19mm



3.2.3 Óxido de Ferro

O aditivo óxido de ferro utilizado nesta pesquisa, foi adquirido no mercado local, através de uma empresa terceirizada, a empresa Unimassa Argamassas, localizada na cidade de João Pessoa, PB (Figura 21). Trata-se de um pigmento inorgânico colorante, produzido pela LANXESS, empresa de especialidades químicas. São pigmentos pulverulentos, que possuem alto poder de tingimento. São extremamente resistentes à ação da luz e intempéries.

Figura 21 - Óxido de Ferro



O óxido de ferro incorporado nesta pesquisa foi também empregado por Del Carpio (2014), assim como a escolha das cores utilizadas o amarelo e o vermelho, por serem as colorações que apresentaram resultados mais satisfatórios em seus estudos.

O pigmento utilizado não precisou passar por nenhum processo de preparação antes da mistura, pois o mesmo já foi adquirido em condições satisfatórias para ser usado na mistura em questão.

3.3 Métodos

3.3.1 Propriedades físicas dos materiais

Neste tópico serão apresentados os ensaios de granulometria, massa específica dos agregados graúdos e miúdos, abrasão Los Angeles e absorção, utilizados para caracterização dos agregados. A Tabela 2, apresenta as normas que foram utilizadas nos procedimentos de caracterização física dos agregados.

Tabela 2 - Ensaios e normas utilizadas para caracterização dos agregados

Ensaios	Métodos
Determinação da massa específica dos agregados miúdos	DNIT ME 194/98
Determinação da massa específica dos agregados graúdos	DNIT ME 195/97
Distribuição dos tamanhos das partículas dos agregados	DNIT ME 083/98
Abrasão Los Angeles	DNIT ME 035/98

Os ensaios acima mencionados foram realizados no Laboratório de Engenharia de Pavimentação (LEP), na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

3.3.1.1 Granulometria

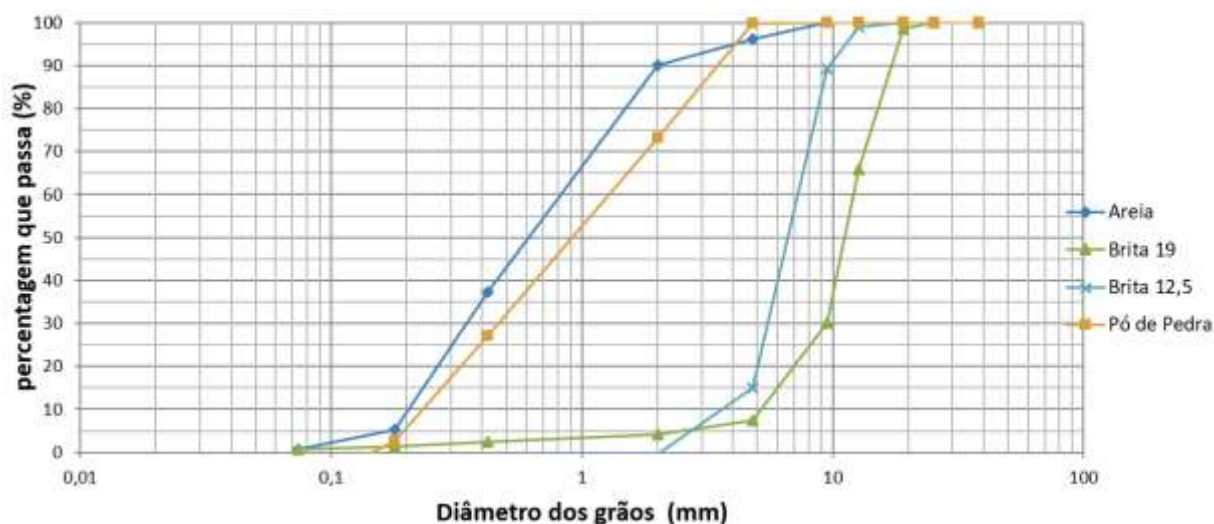
Foi realizado segundo a norma DNIT-ME 083/98, a qual recomenda o uso das peneiras de malhas de abertura 0,075 mm, 0,18 mm, 0,42 mm, 2,0 mm, 4,8 mm, 9,5 mm, 12,7 mm e 19,1 mm. A norma propõe ainda quartear o material para separação da amostra, para posteriormente ser retirado a umidade, deixando o mesmo, cerca de 4 horas na estufa a 110°C, para ser realizado o peneiramento manual.

A Tabela 3 e o gráfico da (Figura 22), apresentam a distribuição dos tamanhos das partículas dos grãos dos materiais granulares utilizados nesta pesquisa.

Tabela 3 - Granulometria dos agregados

Peneira	Diâmetro (mm)	Brita 19 mm	Brita 9,5 mm	Areia	Pó de Pedra
1"	25,40	100	100	100	100
3/4"	19,00	96,69	100	100	100
1/2"	12,70	51,07	99,04	100	100
3/8"	9,50	6,47	89,40	100	100
Nº 4	4,80	0,15	16,16	97,14	99,78
Nº 10	2,00	0,13	1,02	93,30	76,93
Nº 40	0,420	0,12	0,71	48,72	37,23
Nº 80	0,180	0,10	0,59	22,42	16,11
Nº 200	0,074	0,06	0,35	7,28	6,16

Figura 22 - Curva granulométrica dos agregados



3.3.1.2 Massa Específica dos Agregados

A massa específica do agregado miúdo foi obtida por meio dos métodos de ensaio da norma NBR NM 52/20.

Para a realização do ensaio foi necessário cerca de 2000g do agregado miúdo passante na peneira Nº4 e retida na peneira Nº 200, imerso em água a temperatura ambiente durante 24 horas.

Este ensaio, especificado pela norma DNIT ME 054/97, tem como objetivo a determinar a quantidade de argila ou material orgânico presente no agregado miúdo através de uma relação volumétrica que corresponde à razão entre a altura do nível superior da areia e a altura do nível superior da suspensão argilosa de uma determinada quantidade de agregado miúdo, numa proveta, em condições estabelecidas.

A Tabela 4 apresenta os resultados dos ensaios de massa específica dos agregados graúdos e miúdos.

Tabela 4 - Resultados do ensaio de massa específica com agregados graúdos e miúdos

Agregados	Massa Específica Real (g/cm³)	Massa Específica Aparente (g/cm³)	Absorção (%)
Brita 19mm	2,72	2,67	0,28
Brita 12,5mm	2,75	2,68	0,51
Areia	2,52	2,47	0,16
Pó de Pedra	2,43	2,42	0,74

Os valores de massa específica real e aparente dos agregados estão dentro dos limites estabelecidos na literatura para cada tipo de material utilizado na região (Nascimento, 2011; Souza, 2012; Gama, 2013; Sales, 2015). Esses dados foram utilizados para a determinação do teor ótimo de CAP para a dosagem SUPERPAVE.

3.3.1.3 *Equivalente Areia*

De acordo com a norma DNIT 031/2006- ES o ensaio de equivalente areia deve apresentar um valor mínimo para agregados miúdos de 55%. A areia e o pó de pedra atenderam o requisito mínimo, conforme mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados do ensaio Equivalente areia

Ensaio	Requisito	Agregados Miúdos	
		Areia	Pó de pedra
Equivalente areia	55%	82,06%	56%

3.3.1.4 *Abrasão Los Angeles*

Ensaio realizado segundo a norma DNIT – ME 035/98, o qual consiste em submeter certa quantidade de amostra à choques e desgastes durante a rotação de um tambor metálico de 80 centímetros de diâmetro a uma velocidade de 30 a 33 rpm, com a presença de doze bolas de aço, objetivando submeter o material a desgastes.

Foi realizado nos agregados graúdos, a brita 19 mm e a brita 12,5 mm que apresentaram um desgaste Los Angeles respectivamente de 25,40% e 22,30%, (Tabela 6) valores dentro dos critérios estabelecidos pela norma do DNIT 031/2006 ES, a qual recomenda valor máximo igual ou inferior a 50%.

Tabela 6 - Resultado do ensaio de Los Angeles

Ensaio	Requisito	Agregados Graúdos	
		Brita 19mm	Brita 12,5mm
Los Angeles	50,00%	25,40%	22,30%

3.3.2 Caracterização do Óxido de Ferro

Visando um melhor conhecimento acerca do óxido de ferro, com relação à estrutura e características físicas e químicas, foi executado o ensaio de Difração de Raio-X (DRX), o qual consiste num fenômeno de espalhamento da radiação eletromagnética, provocada pela interação entre o feixe de raios-X incidente e os elétrons dos átomos componentes de um material .

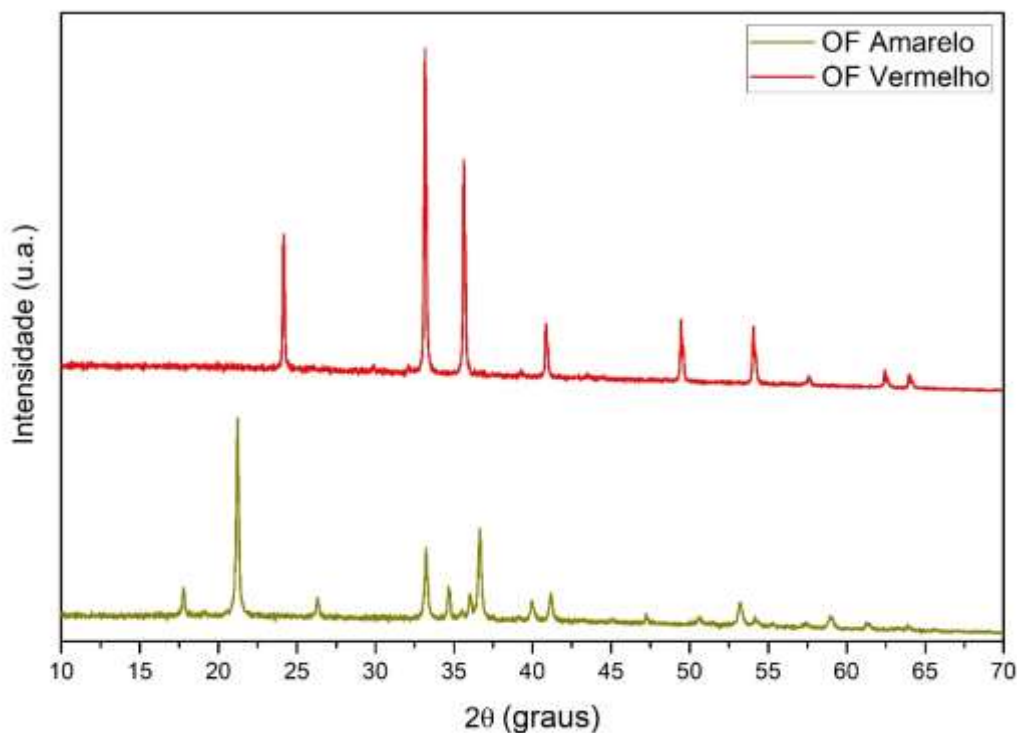
É uma técnica usada para determinar a estrutura atômica e molecular de um cristal, na qual os átomos cristalinos fazem com que um feixe de raios-X incidentes difrate em muitas direções específicas.

3.3.2.1 DRX

O equipamento utilizado para realização do ensaio foi o *Bruker D2 Phaser*, com tubo de cobre com comprimento de onda de 1,5406 angstroms, utilizado para difração de pó, com faixa angular de 3-70° com duração de análise de 6 minutos e Step size de 0,02°.

A figura (Figura 23) mostra os resultados do ensaio de difração de raios-X dos pigmentos Amarelo e Vermelho. Os resultados mostram que as amostras possuem uma estrutura cristalina pouco amorfa, o que pode favorecer a baixa ou nenhuma reatividade destes óxidos com outros materiais.

Figura 23 - DRX dos pigmentos Vermelho e Amarelo



De acordo com a Figura 23 é possível verificar que apesar da composição química semelhantes dos pigmentos Amarelo e Vermelho, os mesmos apresentam diferentes origens por conta da cristalização do óxido de ferro. (DEL CARPIO, 2014).

O óxido de ferro Amarelo é um derivado do mineral Goethite que é um mineral argiloso muito presente em solos de clima tropical como o Brasil, conferindo uma coloração amarela ao solo. Já o pigmento Vermelho é derivado do mineral Hematita sendo o óxido de ferro propriamente dito e é encontrado em solos de regiões tropicais e subtropicais conferindo uma coloração vermelha aos solos. Além desse mineral, o óxido de ferro Vermelho, possui pequenas quantidades de calcita, o qual seria parte da composição química das resinas deste produto (DEL CARPIO, 2014).

A faixa angular é prevista de 3-70°, porém no resultado em questão ela aparece de 10-70°, isso se deve a inexistência de picos relevantes abaixo dessa faixa.

3.3.3 Caracterização do Cimento Asfáltico de Petróleo

Será apresentada a caracterização física do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) a partir dos ensaios de: penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional e Rolling Thin Film Oven Test (RTFO). Essa caracterização foi feita em laboratório de

Engenharia de Pavimentos (LEP). Na tabela a seguir, (Tabela 7) estão apresentadas as normas utilizadas para a realização dos ensaios.

Tabela 7 - Normas dos ensaios de caracterização física do ligante

ENSAIOS	METODOLOGIA
Viscosidade Rotacional	NBR 15184/2007
Ponto de Amolecimento	DNIT ME 131/2010
Penetração	DNIT ME 155/2010
RTFO	ASTM D 2872-04

3.3.3.1 Ensaio de Penetração

É o ensaio utilizado para medir a consistência do CAP, a qual é, tanto maior quanto menor for a penetração da agulha. Este ensaio é normatizado pela norma brasileira NBR 6576/98 da ABNT (SALES, 2015).

Em cada ensaio, são realizadas três medidas de penetração. A média dessas três medidas é anotada e aceita se a diferença entre as três medidas não exceder um limite especificado em norma. A consistência do CAP é tanto maior quanto menor for a penetração da agulha.

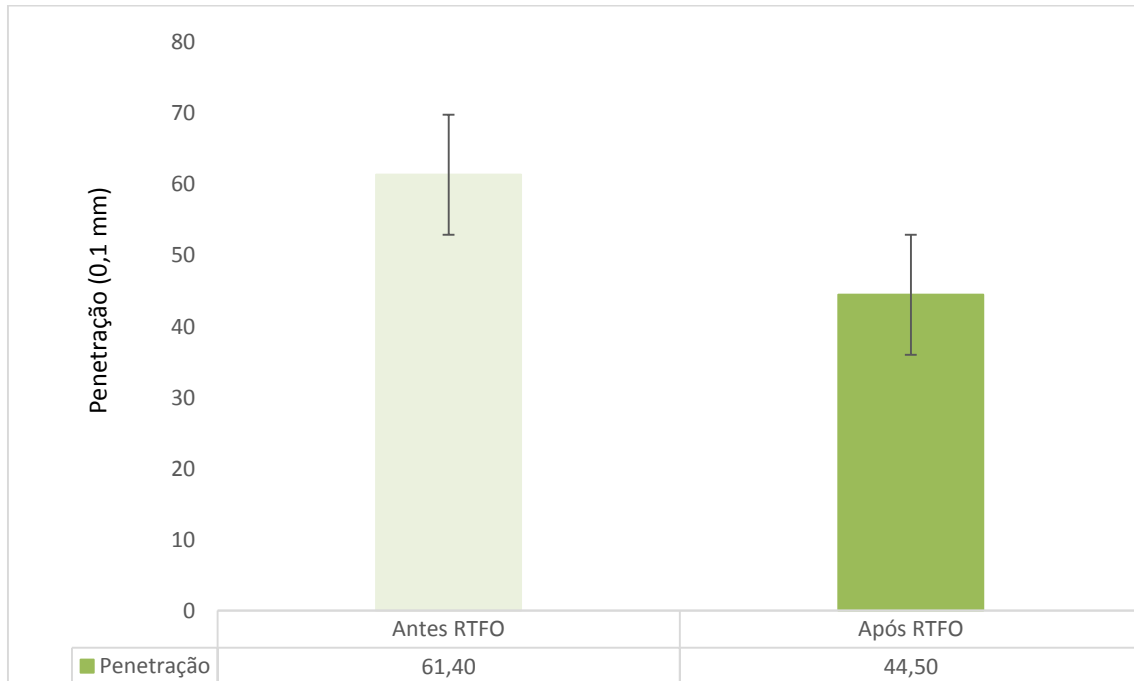
O equipamento utilizado para tal ensaio foi o penetrômetro (Figura 24), o qual apresenta uma haste de $47 \pm 0,05\text{g}$ que fixa a agulha, já o conjunto que apresenta a haste mais agulha deve apresentar $100 \pm 0,05\text{g}$.

Figura 24 - Penetrômetro



Os resultados do ensaio de penetração das amostras do ligante puro em estudo, o CAP 50/70, antes e após o envelhecimento à curto prazo em estufa RTFO estão ilustrados na Figura 25.

Figura 25 - Ensaio de penetração antes e após o RTFO



O resultado para o CAP 50/70 antes de procedimento em estufa RTFO encontra-se dentro do especificado pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), segundo resolução nº 19/2005. Após o processo de envelhecimento à curto prazo ocorreu uma diminuição do valor da penetração decorrente da oxidação que ocorre nesse procedimento. Segundo Bulatovic *et al.* (2014) o aumento da dureza do ligante asfáltico no processo de envelhecimento é provocado pelo aumento da quantidade de asfaltenos no ligante envelhecido, provocando uma modificação na sua composição química.

De acordo com a ANP 32/2010 a penetração retida deve ser no mínimo 55% segundo a norma DNIT 095/2006 – EM, assim quanto mais próximo de 100% menor será a susceptibilidade do ligante ao envelhecimento e, conseqüentemente maior será a sua resistência a oxidação. A Tabela 8 mostra que o resultado da Penetração Retida para o CAP 50/70 utilizado na pesquisa foi superior ao mínimo especificado pela resolução da ANP e pela norma do DNIT.

Tabela 8 - Penetração retida do CAP 50/70

Característica	CAP 50/70
Penetração Retida (%)	72,5

3.3.3.2 Ponto de Amolecimento

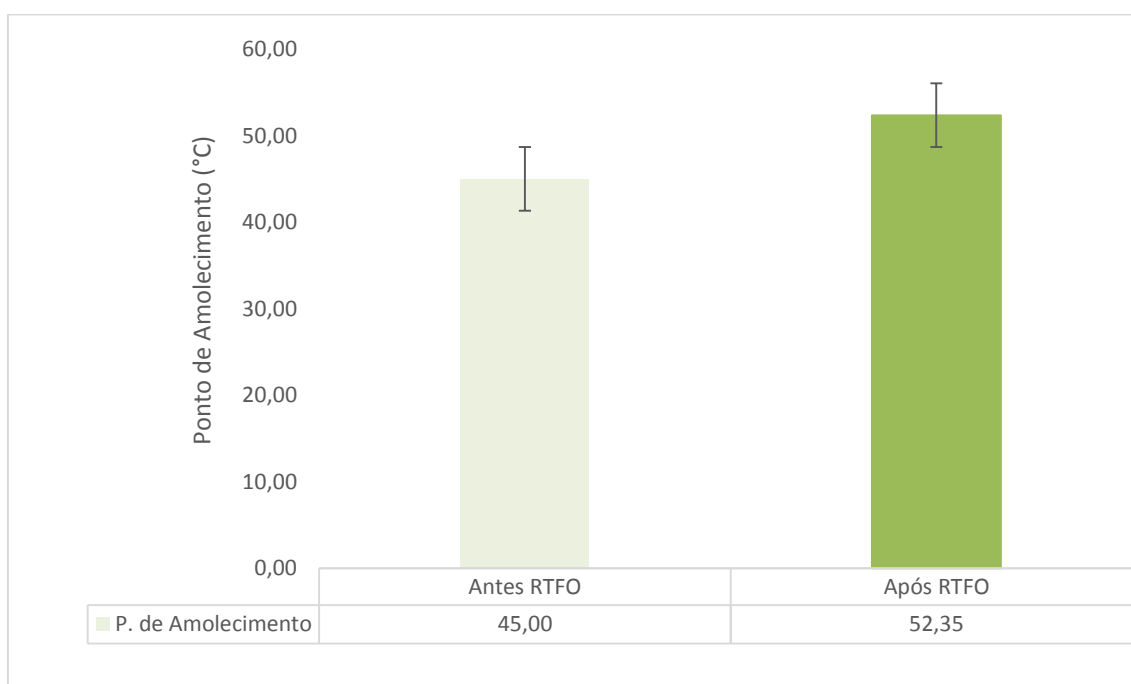
O ponto de amolecimento é uma medida empírica que correlaciona a temperatura na qual o asfalto amolece quando aquecido, sob certas condições particulares, e atinge uma determinada condição de escoamento. O ensaio é regulamentado pela norma DNIT ME 131/201, e consiste em uma esfera metálica atravessar um anel com material betuminoso até encontrar uma base metálica, (Figura 26) todo o material utilizado é padronizado (BERNUCCI, 2007).

Figura 26 - Realização do ensaio de ponto de amolecimento



O parâmetro do ponto de amolecimento está ligado com a conservação das propriedades do ligante a altas temperaturas e aumento da resistência à deformação permanente. Os resultados das amostras ensaiadas antes e após envelhecimento a curto prazo (RTFO) estão apresentados na Figura 27.

Figura 27 - Ponto de amolecimento antes e após envelhecimento em RTFO.



A norma DNIT 095/2006 – EM determina que após o processo de envelhecimento em estufa RTFO a variação no ponto de amolecimento não deve ser superior a 8°C levando em consideração o ligante antes do procedimento de envelhecimento. A Tabela 9 mostra a variação desse parâmetro e verifica-se que o ligante em questão se encaixa no especificado em norma.

Tabela 9 - Variação do ponto de amolecimento do CAP 50/70

Característica	CAP 50/70
Aumento de Temperatura (°C)	7,3

3.3.3.3 *Viscosidade Rotacional*

Tem-se que a viscosidade é uma medida da consistência do cimento asfáltico, por resistência ao escoamento. Esse ensaio tem como objetivo estabelecer as propriedades reológicas dos ligantes asfálticos convencionais e modificados durante o manuseio e a usinagem da mistura asfáltica a altas temperaturas, permite ainda obter a curva Viscosidade x Temperatura em ampla faixa de determinação utilizando a mesma amostra.

A medida de viscosidade permite determinar a consistência adequada do ligante para sua aplicação no campo e para obter uma mistura asfáltica com perfeita aderência do ligante com os agregados. Normatizado pela NBR 15184/2004 e pela ASTM D 4402/2006 o ensaio é feito a temperaturas de 135°C, 150°C e 177°C, com as velocidades de 20, 50 e 100 RPM, respectivamente, (SANTOS, 2012). Realizado em um equipamento do tipo Brookfield, modelo DVII+, o qual é acoplado a um controlador de temperatura, THERMOSEL (Figura 28).

Figura 28 - Viscosímetro Brookfield



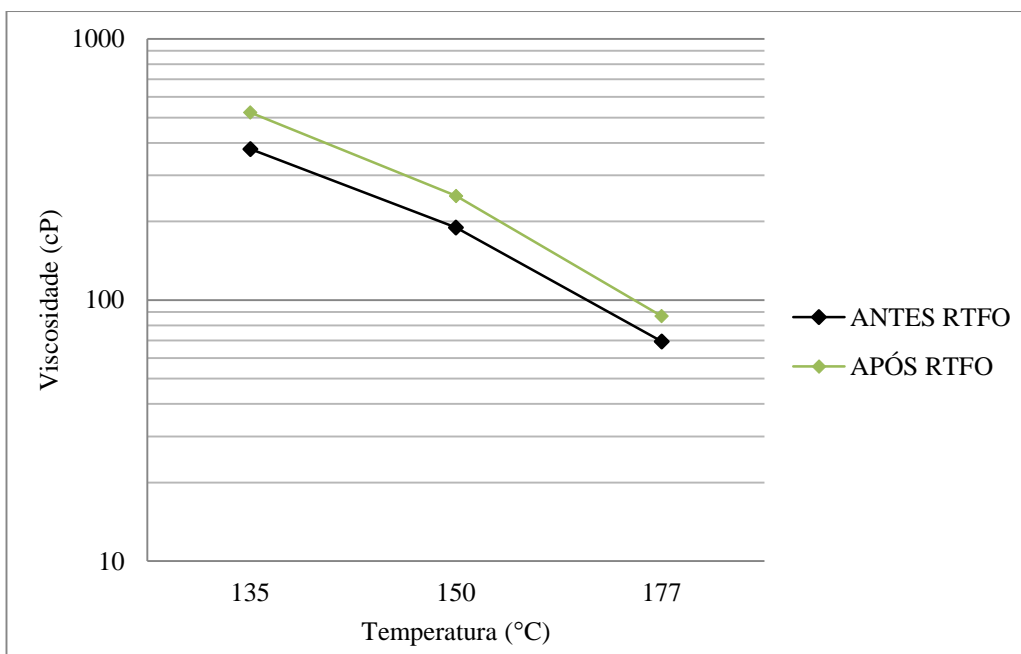
A viscosidade do ligante é um parâmetro de grande importância, pois ela está relacionada com a aderência do ligante aos agregados da mistura e com a otimização da consistência adequada das misturas asfálticas para sua aplicação em campo, merecendo destaque a determinação das temperaturas de usinagem e compactação já que uma

viscosidade elevada necessita de altas temperaturas nesses processos da pavimentação podendo torna-se inviável o uso desse material (SANTOS *et al.*, 2018). A Tabela 10 e Figura 29 mostram os resultados do ensaio realizado para o ligante puro CAP 50/70 antes e após o procedimento de envelhecimento à curto prazo.

Tabela 10 - Viscosidade rotacional do CAP 50/70

Viscosidade Rotacional (cP)	Antes RTFO	Após RTFO
135°C	378.8	522,5
150°C	189.5	250,5
177°C	69.5	86,8

Figura 29 - Viscosidade rotacional do CAP 50/70



Tanto a resolução ANP n° 19/2005 como a metodologia SUPERPAVE determinam limites mínimos e máximos para os valores de viscosidade do ligante asfáltico em todas as temperaturas de ensaio dessa maneira, o CAP 50/70 em estudo se encaixa nos limites estabelecidos.

Ao analisar o ligante asfáltico antes e após o procedimento em estufa RTFO verificou-se uma elevação da viscosidade, fato que já era previsto. De acordo com Cravo (2016) 80% do envelhecimento do ligante asfáltico ocorre em curto prazo devido aos processos de oxidação e volatilização, dessa maneira a composição química desse material é alterada, mantendo-se constante a quantidade de saturados, diminuindo os aromáticos e aumentando as resinas e os asfaltenos. Cabendo ainda enfatizar que os saturados

permaneceram inalterados devido sua baixa reatividade química (SOBREIRO, 2014). Diante disso, à medida que aumenta a quantidade de asfalto aumenta também a consistência do ligante, portanto, será mais viscoso, apresentará menor penetração e maior ponto de amolecimento.

As TU e TC foram encontradas por um método tradicional que define uma TU onde o ligante possua uma viscosidade rotacional de $0,17 \pm 0,02$ Pa.s e uma TC na qual apresente viscosidade rotacional de $0,28 \pm 0,03$ Pa.s. Os resultados das TU e TC encontram-se na Tabela 11.

Tabela 11 - Temperaturas de Usinagem e Compactação do CAP 50/70

Temperaturas de Usinagem e Compactação		
CAP 50/70	Usinagem (°C)	Compactação (°C)
	153,0	141,5

3.3.3.4 RTFOT (Envelhecimento)

O Rolling Thin Film Oven Test, (RTFOT) é um ensaio normatizado pela ABNT NBR 15235/2005 e pela ASTM D 2872-97, mede o envelhecimento por oxidação e vaporização expondo o ligante ao efeito de calor e ar, sobre uma película de material asfáltico em movimento, são determinados a partir de alterações nos valores das análises físicas como medidos antes e depois do tratamento na estufa RTFO (Figura 30).

Tem a função de identificar mudanças nas propriedades do asfalto que podem acontecer durante a usinagem a 150 °C, verificadas por variações nas propriedades de constância, assim como, determinar a variação de massa indicando assim a volatilidade do asfalto.

Figura 30 - Aparelho de RTFO



3.4 Dosagem SUPERPAVE

A metodologia Superpave (Superior Performing Asphalt Pavements) foi desenvolvida pelo Strategic Highway Research Program (SHRP), um programa de pesquisa de asfalto dos Estados Unidos, que tem por objetivo atender e reduzir a deformação permanente, as trincas por fadiga e variação de temperatura, bem como avaliar os efeitos do envelhecimento e danos de umidade (KENNEDY *et al*, 1994).

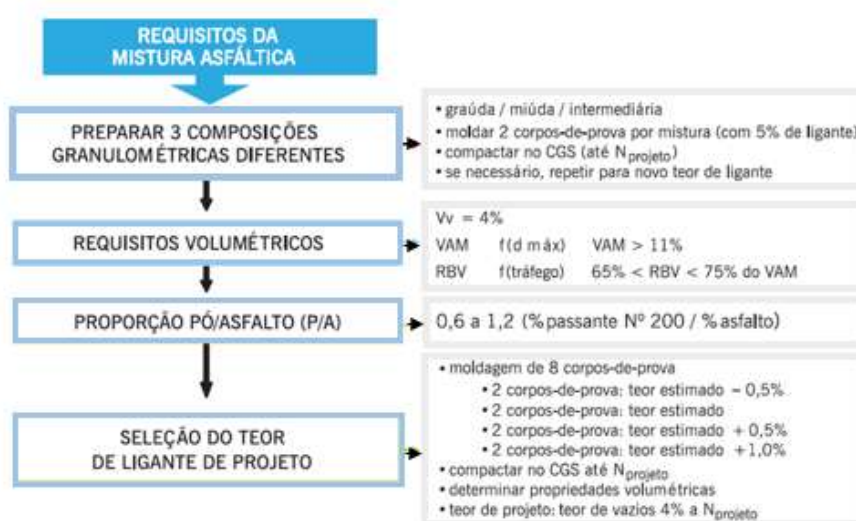
Bernucci *et al* (2007), relatam que a maior diferença entre as dosagens Marshall e SUPERPAVE é a forma de compactação, enquanto a dosagem Marshall a compactação é por impacto, na SUPERPAVE é por amassamento. Outra diferença está na forma de escolha da granulometria, que na metodologia SUPERPAVE inclui os conceitos de pontos de controle e zonas de restrição.

Para “SUPERPAVE MIX DESIGN - ASPHALT INSTITUTE” esses pontos de controle agem como faixas as quais devem passar as gradações e esses alteram dependendo do tamanho nominal da composição de agregados (GAMA, 2013).

Enquanto que a zona de restrição, pode ser considerada uma medida empírica, numa região em que não deveria passar a curva, para que não se tenha uma mistura bastante frágil e dependente do ligante para ter resistência ao cisalhamento (BERNUCCI, 2007).

O Fluxograma da figura a seguir, (Figura 31) ilustra todo o processo da dosagem SUPERPAVE.

Figura 31 - Fluxograma de dosagem SUPERPAVE



Fonte: BERNUCCI et al., 2008

A compactação dos corpos de provas se dá por amassamento através de um compactador giratório (Figura 32), baseado na norma ASTM D 6925-09 (Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyratory Compactor).

Figura 32 - Compactador Giratório SUPERPAVE



Para a realização da dosagem SUPERPAVE preconiza-se a escolha de três composições granulométricas a partir dos agregados disponíveis, no caso, (Brita 19 mm, Brita 12,5mm, Pó de Pedra, Areia e Filer). Utilizando-se a faixa C especificada pelo DNIT, como também os Pontos de Controle e Zonas de restrição. Foi elaborada então três curvas Fuller, uma superior, uma intermediária e uma inferior. Inicialmente a dosagem foi realizada com o CAP puro visando a determinação do teor de ligante asfáltico e de agregados de projeto.

As curvas de Fuller superior, intermediária e inferior contêm as proporções de agregados mostradas na Tabela 12.

Tabela 12 - Proporções dos agregados nas granulometrias

Curva	Brita 19mm	Brita 12.5mm	Areia	Pó de Pedra	Cal
Superior	15,0	26,0	12,5	44,0	2,5
Intermediária	26,0	25,0	5,0	41,5	2,5
Inferior	40,0	22,0	2,0	34,0	2,0

Figura 33 - Curva granulométrica Superior

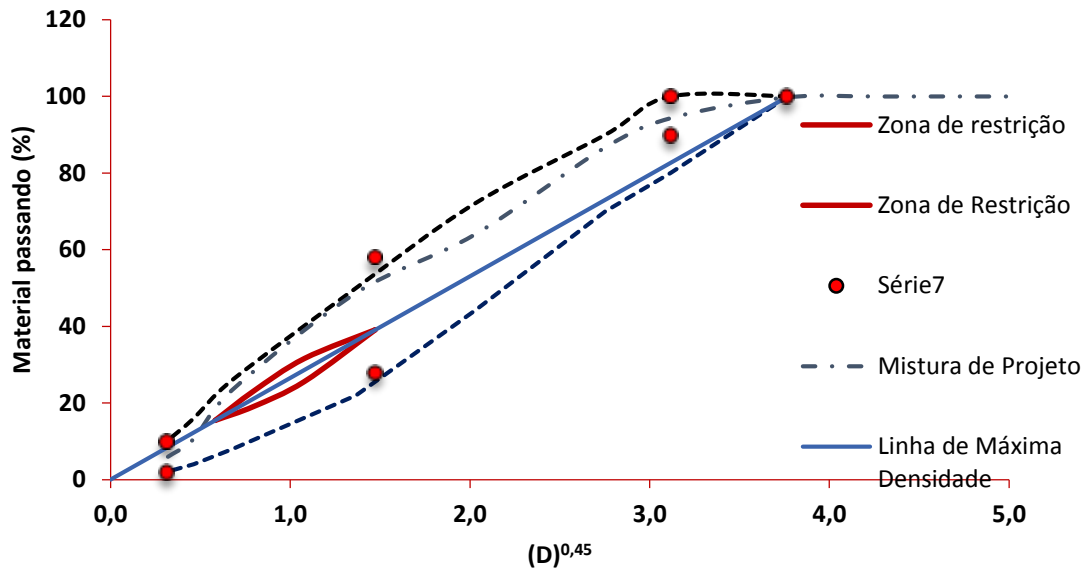


Figura 34 - Curva granulométrica Intermediária

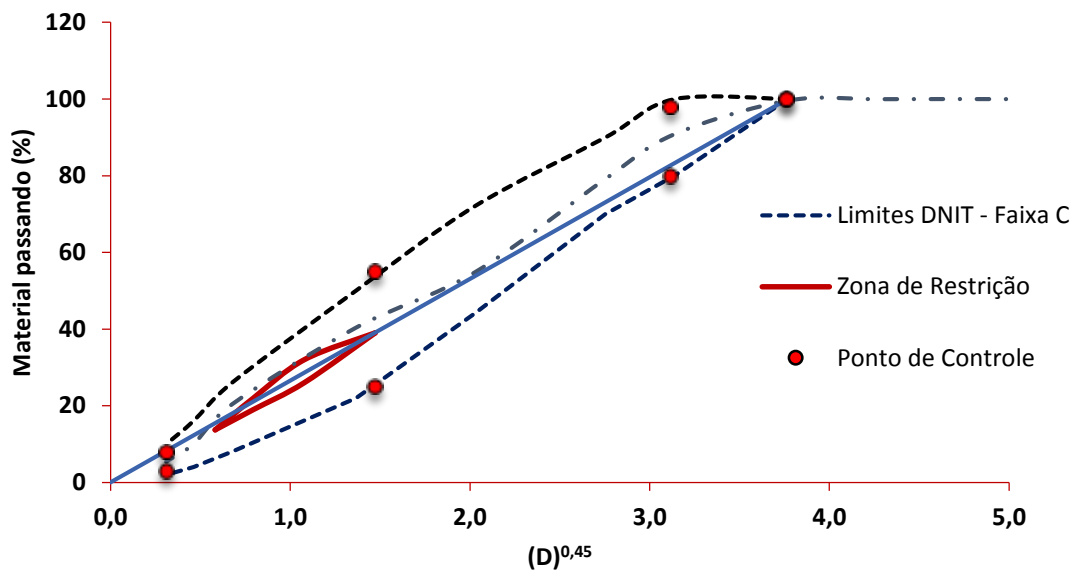
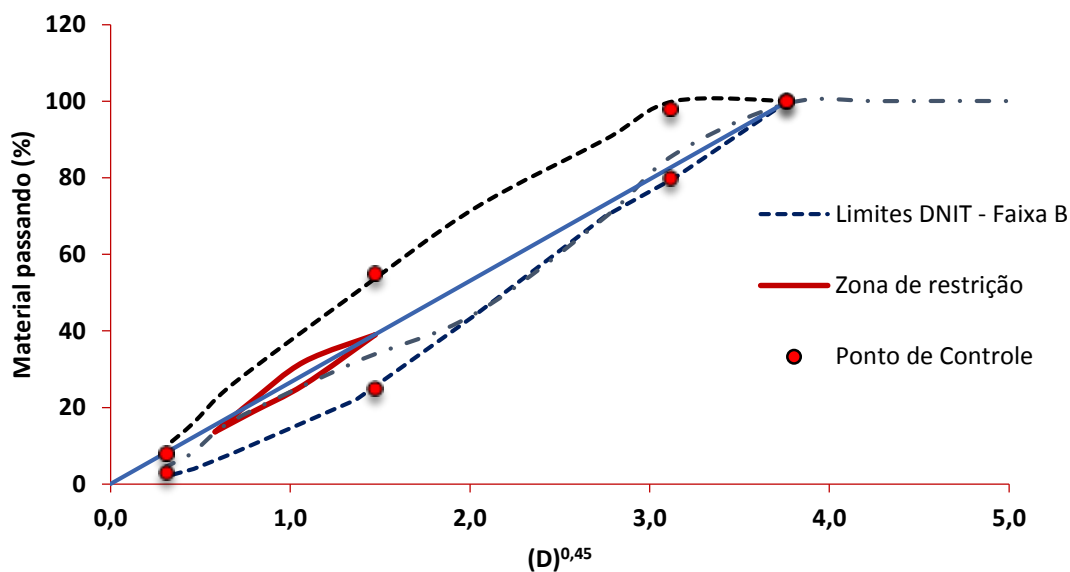


Figura 35 - Curva granulométrica Inferior



Foi realizado também para medida da densidade máxima o método Rice (desenvolvido por James Rice), também denominada de Gmm, preconizado pela norma americana ASTM D2041.

A partir dos dados já existentes de Massa Específica Real e Aparente dos agregados, do ligante e a massa específica máxima medida da mistura (Gmm), obtida a partir Rice Test, foi realizada a determinação do teor de ligante inicial para confecção dos novos corpos de prova. Na figura abaixo (Figura 36) pode ser visto o equipamento utilizado no ensaio para a determinação da Gmm.

Figura 36 - Equipamentos para ensaio de determinação do Gmm



Obteve-se o teor inicial de ligante, após a definição das composições granulométricas das três misturas (inferior, intermediária e superior) com as devidas proporções de agregados e associado às características físicas dos mesmos, segundo a equação a seguir, (Equação 1).

A estimativa do teor de ligante inicial foi feita da seguinte forma:

$$P_{li} = \left[\frac{G_l \times (V_{le} + V_{la})}{G_l \times (V_{le} + V_{la}) + M_{ag}} \right]$$

(Equação 1)

Onde:

Mag = Massa do agregado (g);

G_l = Massa específica do ligante (g/cm³);

P_l = teor de ligante (% em massa);

P_{ag} = percentual de agregado na mistura (% em massa);

P_{li} = teor de ligante inicial (% em massa);

V_{la} = volume de ligante absorvido (%);

V_{le} = volume de ligante efetivo (%).

Realizou-se, portanto, a moldagem de seis corpos de prova para cada curva, sendo estes compactados em diferentes números de giros de acordo o volume de tráfego considerado, para este caso, foi considerado o tráfego Médio a Alto, para o N_{inicial} = 8, N_{projeto} = 100 e o N_{máximo} = 160. O N_{inicial} e N_{máximo} servem apenas para avaliar a compactabilidade da mistura, portanto, o N_{projeto} deve atender aos 4% de V_v e é usado para selecionar o teor de ligante da mistura.

O teor de ligante inicial foi de 5% e foram moldados 18 corpos de prova (Figura 37) sendo 6 corpos de prova para curva inferior, 6 corpos de prova para curva intermediária e 6 corpos de prova para curva superior, sendo dois desses 6 corpos de prova para 8 giros, dois para 100 giros e dois para 160 giros com o intuito de verificar o volume de vazios obtido.

Figura 37 - Corpos de prova com teor inicial de 5% de ligante CAP 50/70 puro



Após a moldagem dos corpos de prova, foi realizado a pesagem dos corpos de prova, secos e submersos, o diâmetro de cada um e a média das alturas para que fosse possível determinar os valores de parâmetros volumétricos de Vv (volume de vazios), VAM (vazios no agregado mineral) e Gmm (massa específica máxima) com o intuito de se escolher a curva a ser trabalhada. Com os resultados obtidos a partir da verificação desses parâmetros volumétricos, foi possível escolher a curva superior, devido ser essa a curva com o volume de vazios o mais próximo de 4% como demonstra a Tabela 13.

Tabela 13 - Resumo da compactação das misturas asfálticas

Misturas	%Ligante	%Gmm N _{inicial}	%Gmm N _{projeto}	%Gmm N _{máximo}	Vv (%)	VAM (%)
Inferior	5,00	93,03	97,42	98,27	2,58	13,59
Intermediária	5,00	91,44	97,08	97,66	2,96	13,80
Superior	5,00	89,31	95,39	96,07	4,61	15,45
Limites		<89,00	96,00	<98,00	4,00	13,0 (min)

O volume de vazios obtido pela curva superior foi o mais próximo de 4% das três curvas, porém passando ainda 0,61 do valor estabelecido para os parâmetros volumétricos, fez-se necessário portanto encontrar um valor ainda mais próximo de 4%. Por isso, foi utilizado a equação abaixo, (Equação 2), para estimar o teor de ligante inicial igual 5,24% para a curva superior.

$$PI(\text{estimado}) = PI_i - [0,4x(4 - V_v)] \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

PI(estimado) = teor de ligante estimado (%);

Pli = teor de ligante inicial – tentativa (%);

Vv = vazios do Nprojeto (%).

Em seguida, foram realizadas novas compactações, com o teor de ligante inicial de 5,24%, e teores de +/- 0,5 e +1,0 e realizado novamente a medição dos parâmetros volumétricos para encontrar o teor ideal de ligante asfáltico.

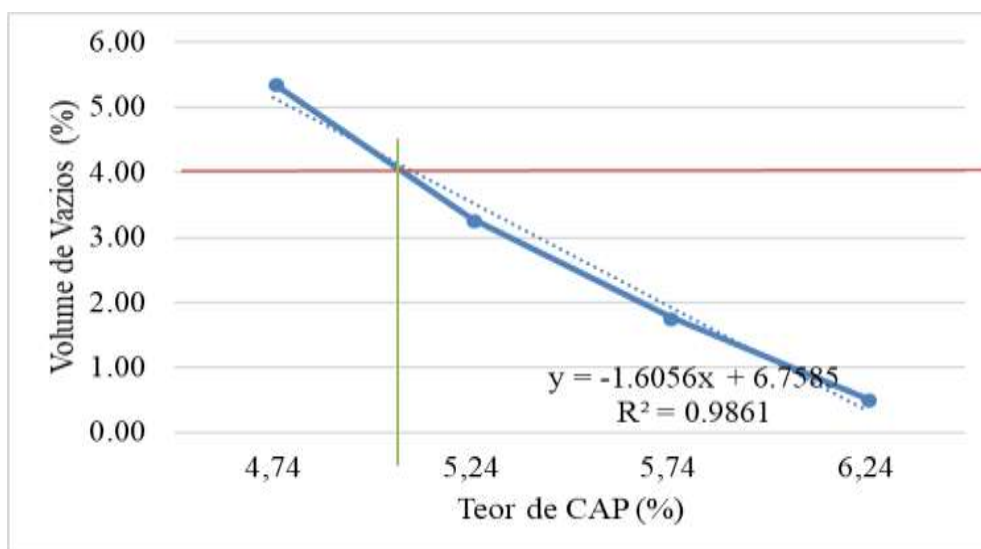
Em seguida, foi possível determinar novamente suas propriedades volumétricas através dos parâmetros volumétricos dos corpos de moldados com os novos teores (Tabela 14).

Tabela 14 - Critérios volumétricos para cada teor de ligante

	4,74%	5,24%	5,74%	6,24%	Valores Normalizados
Vv (%)	5,38	3,29	1,78	0,53	4,00%
VAM (%)	16,24	14,94	14,73	14,41	13,00 mín
Gmm (%)	94,62	96,71	98,22	99,47	96,00
RBV (%)	74,97	73,48	73,63	73,52	65 a 75%

Não obtendo nenhum volume de vazios igual a 4% nas misturas experimentais ensaiadas, foi necessário realizar uma nova tentativa através do gráfico volume de vazios x teor de ligante (Figura 38) onde obteve-se um teor de ligante de projeto de 5,10% para um volume de vazios de 4%.

Figura 38 - Determinação do teor de projeto



Dessa forma elaborou-se uma mistura com o teor de 5,1 e obteve-se os resultados demonstrados na tabela seguinte (Tabela 15) e, portanto, adotou-se para toda a pesquisa um teor de ligante de 5,10%.

Tabela 15 - Resumo dos parâmetros volumétricos para o teor de CAP de 5,10%

%Ligante	%Gmm	VAM (%)	RBV(%)	Vv (%)
5,10	95,94	15,29	73,82	4,06
Limites	96,00	13,0 (min)	65 a 75	4,00

Para tanto, como parâmetro adotado no Laboratório de Engenharia de Pavimentos da UFCG, local de realização dos experimentos para realização dos ensaios mecânicos ficou definido que, a dosagem encontrada para o ligante CAP 50/70 puro, também seria utilizada para a moldagem dos corpos de prova com a adição do óxido de ferro. Assim pode-se comparar as características mecânicas do ligante puro e com a presença do aditivo para a mesma porcentagem de ligante na mistura. A compactação das misturas asfálticas foi realizada segundo a metodologia SUPERPAVE, com número de giros igual a 100.

3.5 Caracterização Mecânica dos materiais

Para essa etapa foram moldados três corpos de prova de cada cor do pigmento, no caso, três corpos de prova vermelhos e três amarelos como mostrados na figura abaixo (Figura 39), com o mesmo teor de asfalto, modificando apenas a proporção dos agregados da mistura, devido a incorporação do pigmento de óxido de ferro, por se tratar de um material pulverulento, com características semelhantes ao filer utilizado.

A adição do óxido foi feita adotando-se um teor de 5%, valor esse estipulado a partir de resultados satisfatórios obtidos por Del Carpio (2014). O óxido foi acrescentado como uma proporção da massa total da mistura sem substituir nem o ligante nem os agregados minerais. No entanto, a adição dos pigmentos causou uma diminuição das proporções de ambos os materiais na massa total.

Figura 39 - Corpos de prova com o óxido de ferro vermelho e amarelo

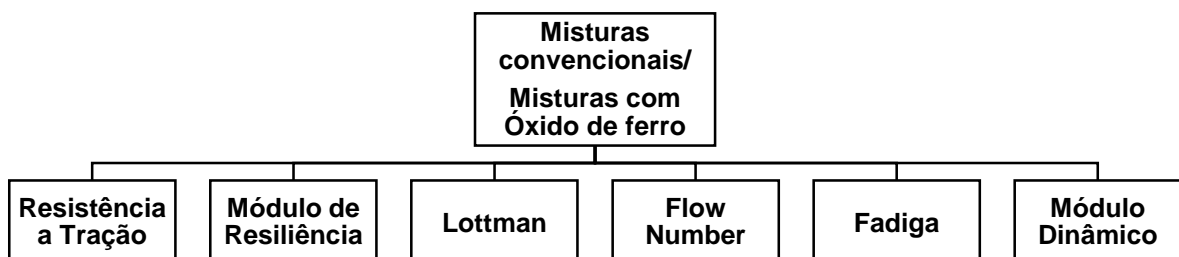


Foi verificado a partir de referências bibliográficas que a mudança do teor de óxido de ferro não apresenta mudanças significativas na coloração da mistura, portanto, foi utilizado apenas o teor de 5% do pigmento em questão.

Os ensaios mecânicos têm como finalidade analisar a influência da adição do óxido de ferro em comparação ao ligante puro no desempenho mecânico das misturas asfálticas. As propriedades analisadas nesta etapa foram, Resistência a Tração (RT), Módulo de Resiliência (MR), Lottman (Dano por Umidade Induzida), Flow Number (FN), Fadiga e Módulo Dinâmico (MD). Todos esses ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da Unidade Acadêmica de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

A Figura 40 apresenta o fluxograma dos ensaios mecânicos realizados a partir da mistura do ligante puro CAP 50/70 e com adição do Óxido de Ferro.

Figura 40 - Fluxograma de Caracterização Mecânica



3.5.1 Módulo de Resiliência

O ensaio do Módulo de Resiliência (MR) foi realizado utilizando a prensa UTM-25 (Figura 41) seguindo o procedimento estabelecido pela NBR 16018/2011. O seu resultado é obtido com auxílio do software UTS0031.39 Indirect Tensile Modulus Test,

que indica a relação entre a tensão de tração aplicada repetidamente no plano diametral vertical e a sua deformação recuperável correspondente à tensão aplicada.

Figura 41 - Prensa UTM-25 utilizada para o ensaio de Módulo de Resiliência



O objetivo é a medição do deslocamento diametral recuperável na direção horizontal correspondente à tensão gerada, numa dada temperatura. Este é realizado aplicando-se uma carga repetidamente no plano diametral vertical de um corpo de prova cilindro regular. Essa carga gera uma tensão de tração transversalmente ao plano de aplicação da carga. (BERNUCCI, 2008).

3.5.2 Resistência à Tração Indireta por Compressão Diametral

Ensaio realizado segundo a norma DNIT 136 (2010), com o propósito de representar o plano de ruptura idêntico ao plano de aplicação da carga, e tem por objetivo a determinação da resistência à tração de corpos de prova cilíndricos de misturas betuminosas (SALES, 2015).

Desenvolvido pelo professor Lobo Carneiro no Rio de Janeiro para concreto de cimento Portland, o ensaio consiste em medir a altura do corpo de prova com o paquímetro em três posições diametralmente opostas, além de medir o diâmetro do corpo de prova em três posições paralelas, fazendo a média desses valores obtidos.

O corpo de prova é então colocado em uma superfície cilíndrica entre dois frisos metálicos a uma temperatura controlada de 25°C, e aplica-se uma carga progressiva, a uma velocidade de deslocamento de $0,8 \pm 0,1$ mm/s, até que aconteça a ruptura do corpo de prova, segundo o plano diametral vertical (Figura 42).

Figura 42 - Equipamento utilizado para realização do ensaio de Resistência a Tração



3.5.3 Ensaio de Lottman Modificado

Esse ensaio tem como princípio avaliar as misturas asfálticas no que diz respeito a sua suscetibilidade à água. É sabido que, essa suscetibilidade das misturas asfálticas à presença de água está diretamente ligada a perda de adesão entre o CAP e os agregados, consequência de infiltração ou do vapor dessa água na mistura asfáltica (LUCENA, 2009). Portanto pode-se dizer que o desempenho das misturas asfálticas está diretamente relacionado às propriedades de adesão e coesão do sistema asfalto-agregado.

Foi realizado de acordo com a norma AASHTO T 283/89, com o objetivo de avaliar os danos causados na mistura asfáltica e consiste em submeter as amostras à ação da água e a ciclos de gelo- degelo.

Foram moldados 4 corpos de prova tanto do CAP puro, quanto para os corpos de prova com adição do Óxido de Ferro, sendo estes divididos em dois grupos, os condicionados e os não-condicionados. Para o ensaio, os corpos de prova apresentaram um volume de vazios de $7\% \pm 0,5\%$.

3.5.4 Flow Number (Deformação Permanente)

Flow Number é considerado um teste de média que mede a deformação permanente, pelo critério diametral de um pavimento, já que este, é um dos defeitos mais comuns da pavimentação asfáltica. No ensaio é feita a simulação de aplicação de cargas repetidas de veículos pesados sobre a estrutura do pavimento, sendo medido, portanto, o parâmetro Flow Number (FN), ou seja, o número de ciclos que o pavimento consegue suportar até que ocorra a fluência.

Para realização do ensaio utilizou-se o equipamento AMPT, com três corpos de prova de cada amostra, dosada segundo a metodologia SUPERPAVE com volume de vazios de 7 a 8%, aplicados ciclos de carga de 200KPa a uma temperatura de 60°C. O carregamento foi aplicado durante um período de 0,1s com repouso de 0,9s, até que fosse atingido um número máximo de 10.000 ciclos ou uma deformação de 50.000 microstrains.

O ensaio não possui norma reguladora, e é realizado sob o confinamento do corpo de prova, quando não é confinado é denominado de deformação permanente por carga repetida. O resultado é dado graficamente relacionando deformação permanente e número de ciclos aplicados, é obtido através de uma curva que pode ser subdividida em três zonas de deformação: a região primária (côncavo para baixo), a região secundária (reta) e a região terciária (côncavo para cima), Figura 43.

Figura 43 - Subdivisões de regiões oriundas do ensaio de Flow Number



De acordo com a imagem acima, observa-se que na região primária, a densificação da amostra acontece a uma taxa elevada, ao passar para a região secundária, a deformação é constante e na região terciária ela já apresenta um crescimento exponencial, apontando o rompimento da amostra.

3.5.5 Ensaio de Fadiga

Este ensaio busca obter um número de solicitações em que uma determinada carga levaria a mistura asfáltica a se romper. No Brasil, o ensaio de fadiga comumente utilizado é à compressão diametral sob tensão e temperatura controladas, não apresentando, até o momento, norma específica para realizá-lo.

O ensaio foi realizado a uma temperatura de 25°C, com níveis de tensões de 50% a 20% da resistência à tração da mistura, a amostra é colocada na câmara da prensa UTM-25, por compressão diametral à tensão controlada, em uma frequência de pulso de 1Hz,

senso 0,1s para a aplicação de uma carga senoidal e 0,9 s para a aplicação de uma carga de repouso, Figura 44.

Figura 44 - Compressão diametral de corpos de prova cilíndricos



A vida de fadiga pode ser representada por várias expressões que indicam o N, expressando o número de solicitações de carga; em termos das tensões ou deformações iniciais, sendo K e n parâmetros de fadiga determinados nos ensaios (BUDNY, 2012). Dentre as formas de representação usuais destacam-se as (Equações 3 e 4).

$$N = K_1 \left(\frac{1}{\sigma_t} \right)^{n1}$$

$$N = K_2 \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{n2}$$

(Equações 3 e 4)

Onde:

σ_t = diferença algébrica entre tensão horizontal de tração e vertical de compressão no centro da amostra;

$\Delta\sigma$ = diferença algébrica entre deformação horizontal de tração e vertical de compressão no centro da amostra;

K, n = constantes obtidas através da regressão dos resultados experimentais (em escala log).

3.6 Temperatura superficial e quantidade de refletância (Albedo) das placas

Visto que, o fenômeno da Ilha de calor urbano é causado pelo aumento excessivo do calor nas áreas urbanas, causado na maioria das vezes pela alta absorção de calor que a pavimentação asfáltica convencional gera, devido ao uso de materiais com baixa refletividade, muitos estudos admitem que, uma alternativa viável para amenizar esse aumento de temperatura no meio ambiente pode ser a mudança da cor das superfícies asfálticas escuras para cores mais claras, as quais são capazes de refletir de fato a luz solar.

A mudança na cor das superfícies urbanas pode ser obtida com uso de pigmentos coloridos, nesse caso o óxido de ferro, que são ideais para a coloração de misturas betuminosas. Possuem uma ampla paleta de tonalidades, fazendo com que a cor final seja influenciada somente pelo betume utilizado, além de serem pigmentos resistentes à luz e estáveis a intempéries e possuem alto poder de tingimento com garantia de longa duração.

Desse modo, para analisar o efeito da incorporação desses corantes na mitigação das ilhas de calor urbano, assim como suas vantagens e desvantagens, e fazer um comparativo do comportamento térmico e mecânico das misturas asfálticas convencionais e coloridas, foi realizado a confecção de placas no próprio laboratório onde foram realizadas todas as dosagens.

3.6.1 Fabricação das placas

Foram fabricadas das três placas de revestimento asfáltico convencional e coloridas em Laboratório, com a mesma metodologia SUPERPAVE utilizada na compactação de todos os outros corpos de prova da pesquisa, em um cilindro com medidas específicas para um quantitativo de material de 9,0 kg utilizando para ambos a mesma granulometria, sendo um com a mistura de referência, (amostra convencional) na cor preto, cor do ligante asfalto e outras duas amostras com a inserção do aditivo utilizado na pesquisa para dar coloração diferente as misturas, um pigmento pulverulento da marca Lanxess nas cores amarelo e vermelho.

A dimensão final das placas ficou de 24x48cm e estas foram fabricadas com o intuito de realizar a medição da refletância e da temperatura superficial em campo (Akbari

et al., 2008). Os corpos de prova utilizados posteriormente na fabricação das placas foram moldados e compactados por amassamento através de um compactador giratório o SUPERPAVE. O volume de vazios foi de 4% e a quantidade de giros foi escolhida de acordo a escolha do tráfego médio a alto que preconiza $N_{projeto} = 100$ giros.

A moldagem dos corpos de prova coloridos foi realizada juntamente com a mistura convencional, após ser adicionado o ligante asfáltico aos agregados e misturados manualmente, fez-se a inserção do corante e misturado até se obter homogeneidade entre todos os materiais e levados novamente a estufa até o momento da realização da compactação, a seguir serão expostas imagens com toda sequência de fabricação da mistura asfáltica convencional e posteriormente a mistura colorida (Figura 45 e Figura 46).

Figura 45 - Mistura asfáltica convencional

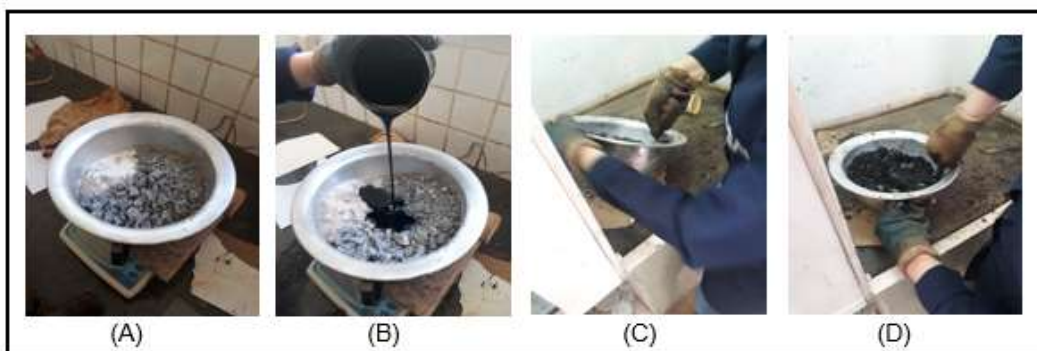
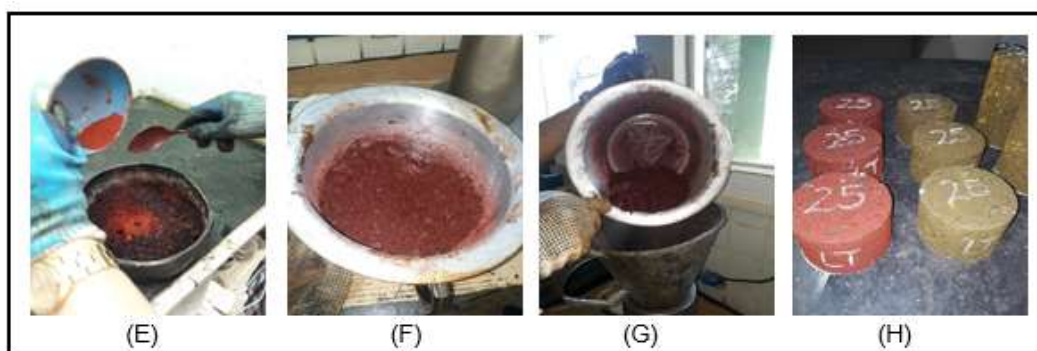


Figura 46 - Mistura asfáltica colorida



A – Agregados retirados da estufa após 2h na temperatura de compactação.

B – Adição do ligante asfáltico – CAP 50/70.

C – Mistura dos agregados com o ligante asfáltico.

D – Finalizada a mistura convencional (agregados + CAP 50/70).

E – Inserção do pigmento (óxido de ferro) a mistura convencional.

F – Mistura colorida totalmente homogênea.

G – Colocação da mistura colorida no cilindro para posterior compactação.

H – Corpos de prova compactados, com 25 giros.

Esses corpos de prova foram utilizados na realização da caracterização mecânica, com o intuito de verificar se as propriedades mecânicas da mistura asfáltica produzida com a incorporação do corante apresentam alguma perda ou ganho, e também para fabricação das placas para a medição da refletância e da temperatura superficial de cada amostra.

Figura 47 - Corpos de Prova com 9kg



Esses corpos de prova foram seccionados com auxílio de uma serra em 5 partes com 4 cm de altura cada parte, em seguida foram cortadas todas as bordas dos círculos obtidos, para que se obtivesse um quadrado com lados iguais para facilitar a montagem da placa (Figura 48).

Figura 48 - Placas medindo 12x12 cm



Em seguida montou-se a placa com dimensões 48x24 cm de cada cor experimentada (Figura 44) para ser utilizada na medição da temperatura superficial e da refletância.

Figura 49 - Placa para medir a refletância e a temperatura superficial (cor preta)



Figura 50 - Placa para medir a refletância e temperatura superficial (cor amarela)

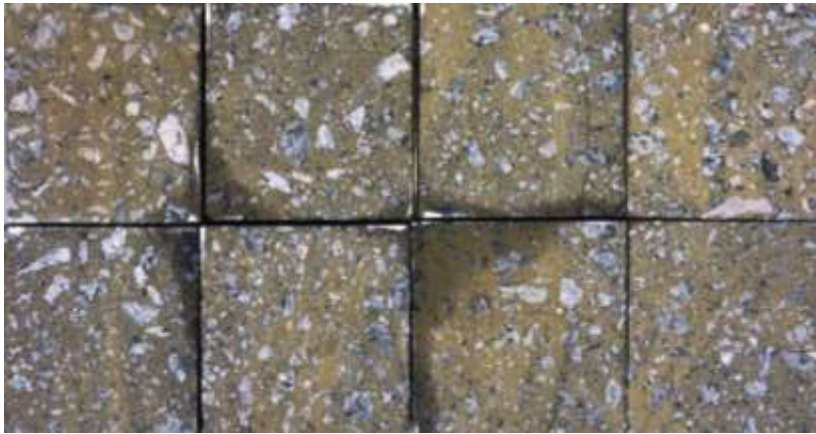
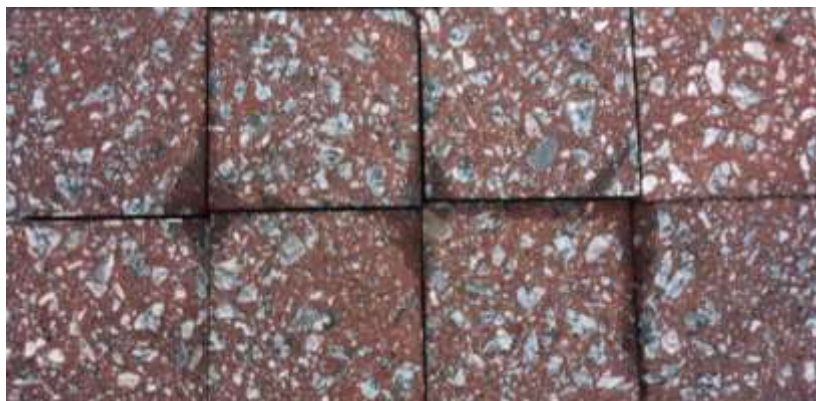


Figura 51 - Placa para medir a refletância e temperatura superficial (cor vermelha)



3.6.2 Medição da temperatura superficial

A medição da temperatura superficial foi realizada em placas de misturas asfálticas nas cores preto, amarelo e vermelho, com dimensões 48x24 cm. Essas placas foram expostas em local com radiação solar direta. Foi verificada a temperatura durante 2 meses,

três vezes na semana no horário entre 10:30 e 11:30 horas da manhã, em dias de céu limpo e sem presença de nuvens, nas três cores sucessivamente.

Essa temperatura foi determinada por meio de um equipamento específico para essa atividade um termômetro laser digital infravermelho (Figura 52).

Figura 52 - Termômetro laser digital infravermelho



Para verificação da temperatura superficial foi aproximado o equipamento cerca de 5 cm da superfície das placas e aguardado um tempo estimado de 7 segundos para leitura da temperatura, conforme instruções do fabricante.

3.6.3 Medição da refletância

A medida da refletância nas placas se deu pela medida do albedo, que é a quantidade de radiação solar que é refletida por um corpo e a quantidade de radiação absorvida por ele, como demonstrado no resumo abaixo (Equação 5):

$$A = R_r/R_a \quad \text{(Equação 5)}$$

A = Albedo

R_r = Radiação solar refletida

R_a = Radiação solar absorvida

As medições foram realizadas a partir do posicionamento do equipamento em um suporte com o intuito de padronizar a distância do equipamento para a placa em todas as medições, essa distância foi de aproximadamente de 5 cm, e as medições foram realizadas

em dias de céu limpo sem presença de nuvens, seguidos da verificação da temperatura superficial.

Portanto, para medição da refletância das placas, foi utilizado um equipamento específico, o medidor de radiação solar power meter/TES -1333, que é um instrumento compacto, resistente e preciso para medir a radiação solar em campo (Figura 53).

Figura 53 - Medidor de Radiação de Energia Solar



Para se obter os valores da radiação refletida e radiação absorvida, foi verificada a radiação com sensor fotovoltaico de silício voltado para cima e para baixo sucessivamente, em seguida foi verificado a quantidade de albedo a partir da relação mostrada na equação 4. As medições de refletância e temperatura superficial de cada placa durou cerca de 2 min, sendo 1 min para medição da quantidade de radiação que é refletida (detector fotovoltaico apontando para cima) e 1 min para quantidade que é absorvida pela superfície (detector fotovoltaico apontando para superfície). E tempo necessário para estabilização do equipamento a cada nova medição era 10 segundos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

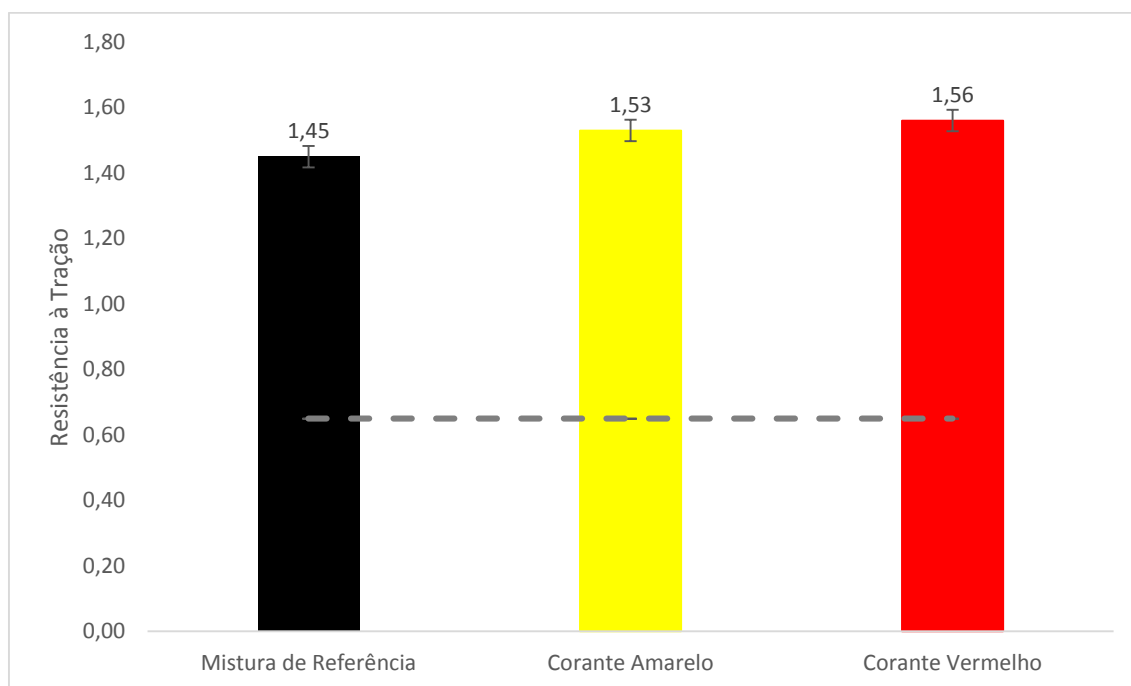
Neste capítulo estão apresentados e discutidos os resultados obtidos na fase experimental desta pesquisa. Serão comentados os resultados da caracterização mecânica, da medição da temperatura superficial e da refletância das misturas com o ligante modificado a partir da adição do óxido de ferro.

4.1 Caracterização mecânica das misturas asfálticas

4.1.1 Ensaio de Resistência a Tração por Compressão Diametral

A Figura 54 apresenta os resultados oriundos do ensaio de Resistência à Tração por compressão diametral para as misturas asfálticas com e sem o óxido de ferro (nas cores amarelo e vermelho). Foram utilizados na realização do ensaio três corpos de prova para cada cor do corante e também para a mistura de referência.

Figura 54 - Resultados do ensaio de Resistência à Tração



O ensaio de tração indireta fornece um estado biaxial de tensões (horizontais de tração e verticais de compressão) que se aproxima bastante das condições produzidas na base das camadas de rolamento por uma carga de roda. Portanto, o que se pode observar é que nestes termos, as amostras que utilizam o óxido de ferro apresentaram valores maiores de resistência em comparação a mistura de referência, propriedade essencial para

que o pavimento mantenha seu desempenho diante da intensidade de aplicação e cargas de tráfego. No entanto, não houve uma diferença significativa entre os dois corantes usados.

De acordo com a norma do DNIT 031/2010 – EM o valor médio da RT deve ser de no mínimo 0,65MPa (25°C), em misturas asfálticas utilizadas em camadas de rolamento. Observou-se que todas as misturas estão de acordo com o especificado pela norma.

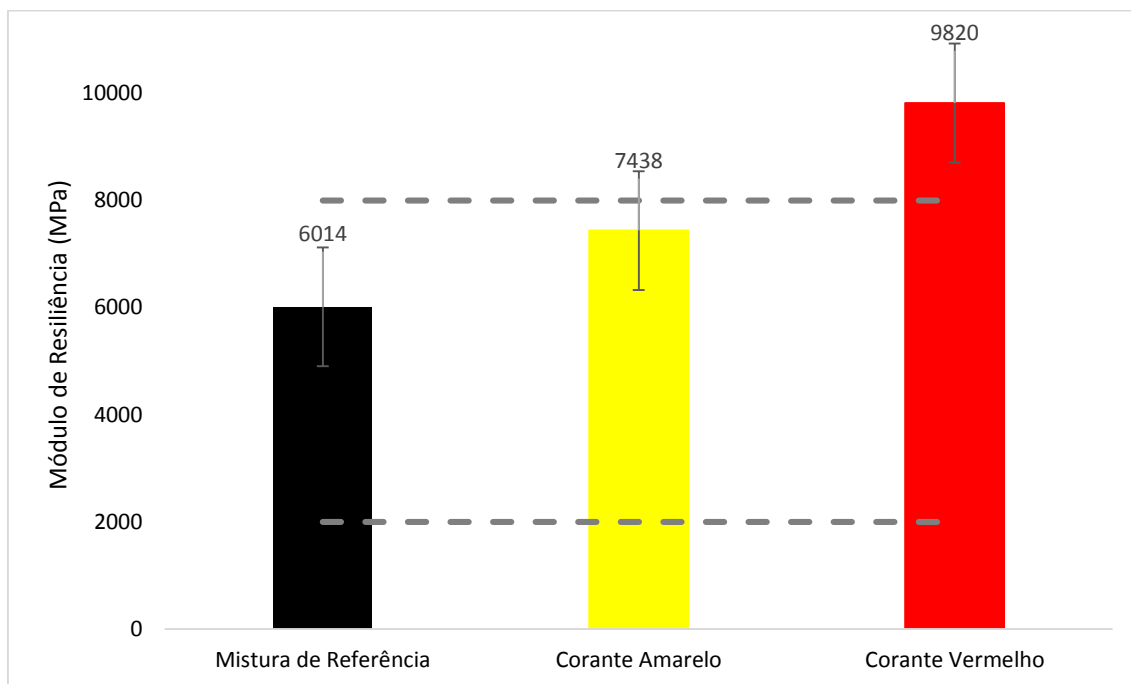
De acordo com Del Carpio (2014) que também estudou a incorporação de corante no ligante asfáltico isso pode ter ocorrido devido as características do material, tido como um material fino, o qual evidencia o enrijecimento da mistura asfáltica, assim como um endurecimento do ligante asfáltico.

Segundo Gama (2016) a resistência à tração de misturas asfálticas está relacionada a sua resistência à ruptura, que por sua vez é associada à resistência à fadiga. Dessa maneira como as misturas asfálticas com adição do pigmento obtiveram em média, maior resistência à tração se comparado a mistura de referência, isso significa maior resistência à ruptura.

4.1.2 Ensaio de Módulo de Resiliência

O módulo de resiliência (MR) é uma medida equivalente ao módulo de elasticidade, porém é obtido por meio de solicitações de carregamentos repetidos de pequena intensidade que simula o efeito das passagens dos veículos no pavimento (GAMA, 2016). Na Figura 55 são apresentados os resultados provenientes desse ensaio que correspondem a média dos valores de três corpos de provas de cada cor analisada e para a mistura de referência.

Figura 55 - Resultados do ensaio de Módulo de Resiliência



De acordo com Bernucci *et al.* (2007) os valores típicos de misturas asfálticas a 25 °C estão situados na faixa de 2.000 a 8.000 MPa. Dessa maneira, notou-se que a adição de pigmentos incrementou o valor do módulo resiliente das misturas asfálticas em relação a mistura de referência, com um destaque para o óxido de ferro vermelho que apresentou valor superior a 8000 MPa indicando consistência dura das misturas. Esse aumento no valor do módulo resiliente com a adição dos corantes está relacionado as mesmas causas do aumento de resistência à tração: aumento da consistência do ligante e enrijecimento da mistura asfáltica (DEL CARPIO, 2014).

No entanto, afirmar que quanto maior o valor do Módulo de Resiliência melhor o desempenho da mistura asfáltica pode não ser verdadeiro. As misturas asfálticas devem possuir resistência à ruptura por carregamento estático e “flexibilidade” suficiente para suportar as solicitações do tráfego, e boa resistência à tração para evitar rupturas prematuras (BALBO, 2007).

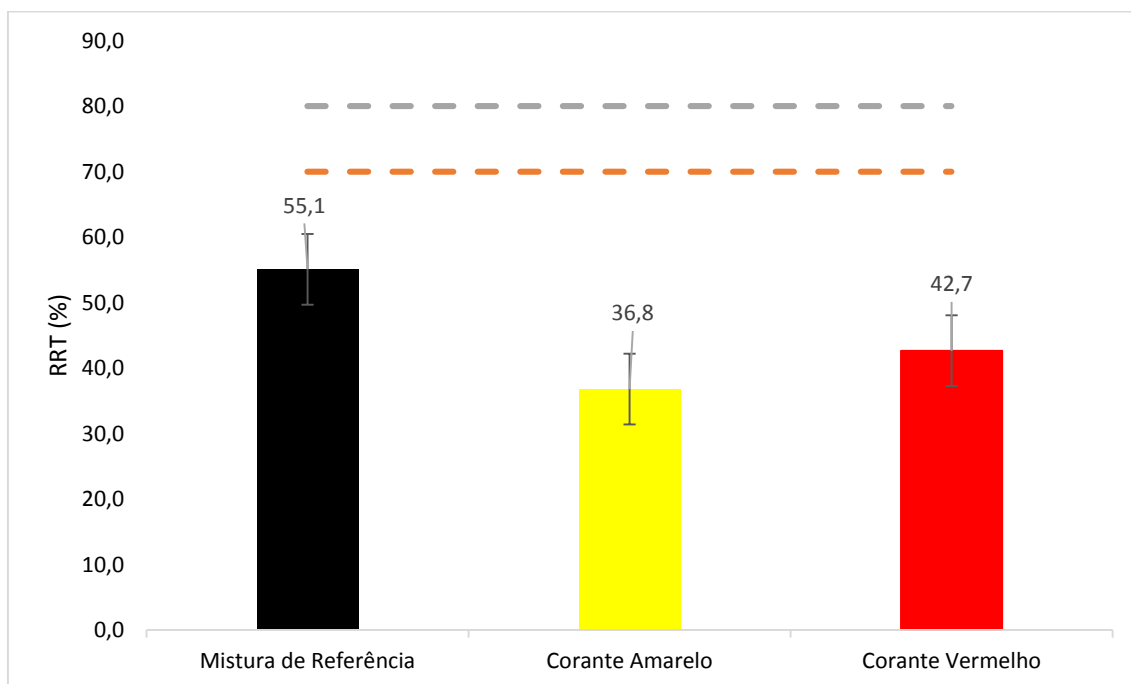
Dessa maneira, segundo Silva (2011) a análise desse parâmetro não pode ser feita de forma direta, uma vez que ele está relacionado à rigidez da mistura. Valores maiores ou menores podem ser aceitos, dependendo da estrutura do pavimento, devendo ser considerada a compatibilidade de deformações entre as camadas que o constituem, principalmente a camada de base.

Conforme Brown *et al.* (2010) o módulo de resiliência de misturas asfálticas faz referência ao módulo de elasticidade deste material, desta forma quanto mais rígido, maior o MR. Todavia, uma maior rigidez não necessariamente indica maior resistência, valores maiores de parâmetro (dureza) indicam que para uma dada carga houve baixa deformação da mistura. Ligantes muito rígidos e que não têm elasticidade podem resultar em uma menor vida de fadiga do pavimento. Por isso para entender melhor o efeito da rigidez e resistência das misturadas com a adição dos óxidos de ferro é preciso complementar a caracterização por meio dos ensaios de módulo dinâmico, deformação permanente e fadiga, que são discutidos adiante.

4.1.3 Ensaio de dano por umidade induzida - Lottman Modificado

O ensaio Lottman Modificado analisou a propriedade de adesividade nas misturas asfálticas medindo a sensibilidade destas à umidade considerando o efeito deletério da água. A resistência ao dano à umidade pode ser observada por meio da relação de resistência à tração (RRT) dada pela RT antes e após condicionamento. Os resultados de RRT para as amostras com CAP 50/70 e com os corantes utilizados estão apresentados na Figura 56.

Figura 56 - Resultados da Relação da Resistência Retida à Tração



Esse ensaio foi realizado seguindo as especificações da norma AASHTO T 283 – 14 e sugere que pelo método SUPERPAVE a RRT mínima deve ser de 80% enquanto que a especificação do DNIT 031/2006 preconiza que este valor deve ser superior a 70%.

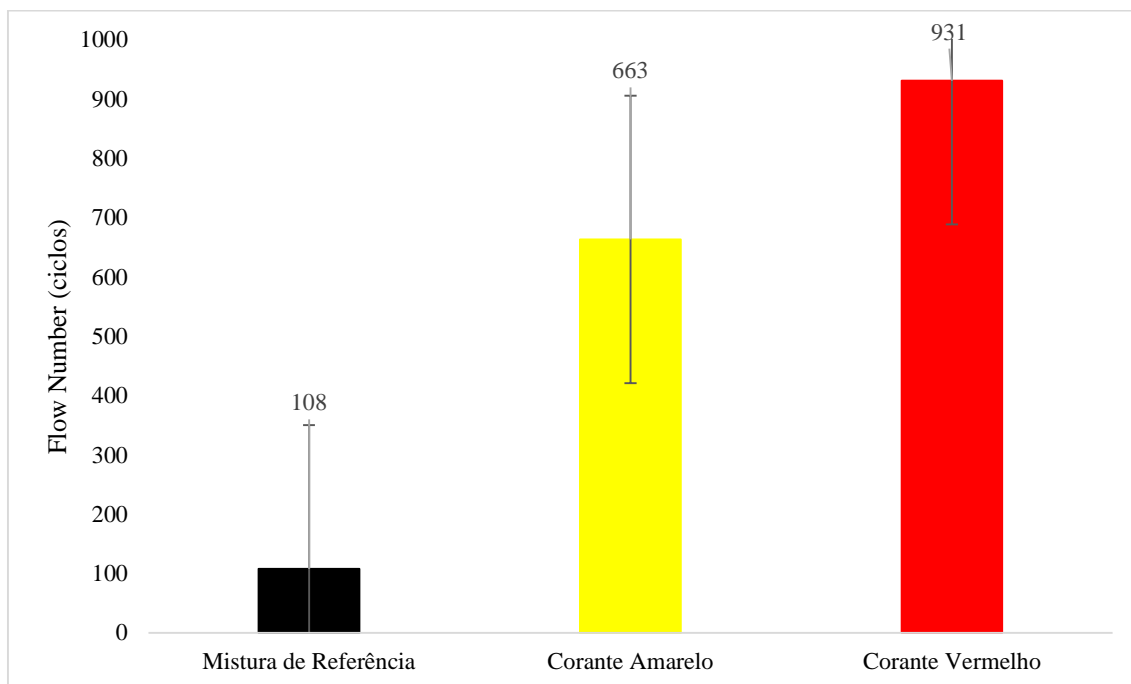
A diminuição da resistência à tração após o condicionamento – indução de umidade na amostra – é dado como um parâmetro para identificar a susceptibilidade da mistura ao deslocamento da película. A mistura de referência não obteve valor mínimo estabelecido pelas normas, indicando a falta de adesividade da mistura asfáltica de referência. Analisando os valores encontrados para as misturas asfálticas com adição de óxido de ferro é possível afirmar que existe uma redução do RRT de 30% para o corante amarelo e 17 % para o pigmento vermelho, ambos em relação ao CAP 50/70, deixando em evidência a falta de adesividade das misturas.

Dessa maneira, pode-se observar que a adição dos pigmentos atuou de forma prejudicial nas misturas asfálticas, devido a redução do RRT em relação a mistura de referência, o que pode indicar uma piora no comportamento destas misturas em campo, principalmente em região de alta pluviosidade. O que indica a ineficiência da aderência entre o ligante e os agregados, já observada no valor de RRT da mistura de referência e acentuada nas misturas com adição de aditivos, no entanto esse problema poderia ser resolvido com a adição de Dop.

4.1.4 Ensaio de Flow Number

O ensaio de *Flow Number* (FN) é considerado um teste de avaliação da deformação permanente de misturas asfálticas em elevada temperatura. Ele foi realizado seguindo as especificações da norma ABNT NBR 16505/2016 e os resultados encontram-se na Figura 57.

Figura 57 - Resultados do ensaio de Flow Number



O critério da *Federal Highway Administration* de Flow Number para os níveis de tráfego, expresso em equivalente de carga por eixo padrão (Equivalent Single Axle Load – ESALs) são dados na Tabela 16. De acordo com Fontenele (2011) o eixo equivalente utilizado para definição dos ESALs é o eixo simples de rodas duplas de 8,2 t (80,1 Kn) e espaçadas de 300 mm (cada conjunto de rodas duplas).

Tabela 16 - Flow Number mínimo requerido pela NCHRP 09-33.

Nível de tráfego, 10 ⁶ ESALs	FN (Ciclos, mín.)
< 3	-
3 a < 10	53
10 a < 30	190
> 30	740

De acordo com esses valores a mistura de referência pode ser utilizada em zonas de tráfego padrão (3 a 10 x 10⁶ ESALs) e as misturas utilizando os corantes como aditivos podem ser utilizadas em zonas de tráfego pesado (10 a 30 x 10⁶ ESALs).

Levando em consideração os parâmetros de referência da pesquisa de Nascimento (2008) para analisar a susceptibilidade das misturas asfálticas à deformação permanente, os valores FN classificam-se de acordo com a Tabela 17.

Tabela 17 - Valores mínimos de Flow Number segundo Nascimento (2008)

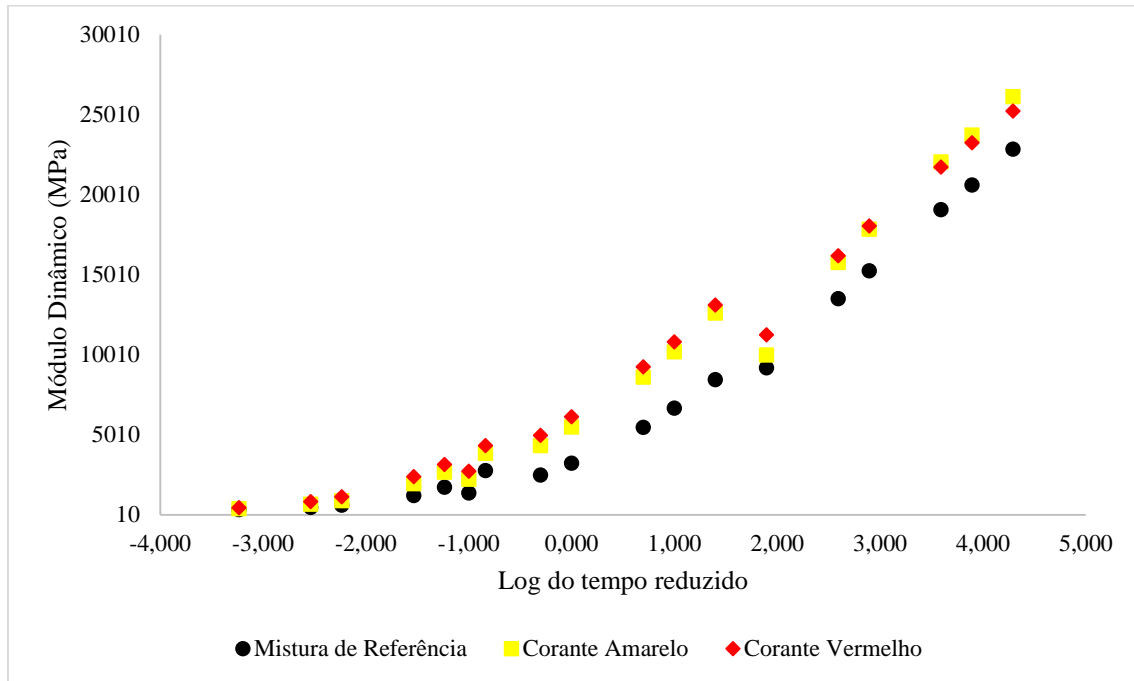
Nível de tráfego	FN (Ciclos, mín.)
Leve ($< 3 \times 10^6$)	-
Médio (3×10^6 a $< 1 \times 10^7$)	300
Pesado (1×10^7 a $< 3 \times 10^7$)	700
Extremamente Pesado ($> 3 \times 10^7$)	-

É possível observar que a mistura de referência com o CAP 50/70 não atingiu sequer o critério para ser empregada em pistas de tráfego médio, devido ao valor de FN ser menor que 300 ciclos. Enquanto que houve um aumento significativo para as misturas com corantes podendo ser utilizada em pistas de tráfego médio. Mostrando que a incorporação dos pigmentos foi importante para o aumento da resistência a deformação permanente.

4.1.5 Ensaio de Módulo Dinâmico

O parâmetro de rigidez da mistura asfáltica em relação a frequência de aplicação de carga e temperatura de ensaio pode ser analisado por meio do intermédio das curvas mestras obtidas no ensaio de módulo dinâmico. Estas são obtidas por meio do processo de superposição tempo-temperatura, utilizando a temperatura de 21°C como referência. A Figura 58 mostra as curvas mestras das misturas asfáltica de referência e com adição dos corantes reunidas em um único gráfico.

Figura 58 - Curvas mestras de todas as misturas asfálticas avaliadas



Percebeu-se que as misturas asfálticas com adição de óxido de ferro amarelo e vermelho apresentaram comportamentos bastante semelhante quando se analisa à relação entre à queda de rigidez da amostra à medida que a temperatura vai aumentando. Ao analisar essas misturas em relação a mistura de referência foi verificado um aumento dos valores para as misturas asfálticas modificadas. Também foi possível perceber que a rigidez de todas as amostras diminui à medida que ocorre a redução da frequência de aplicação de carga.

Estão apresentadas nas Figura 59, Figura 60 e Figura 61 os resultados do ensaio de módulo dinâmico de todas as amostras para cada temperatura do ensaio.

Figura 59 - Módulo dinâmico das misturas asfálticas (4,4°C)

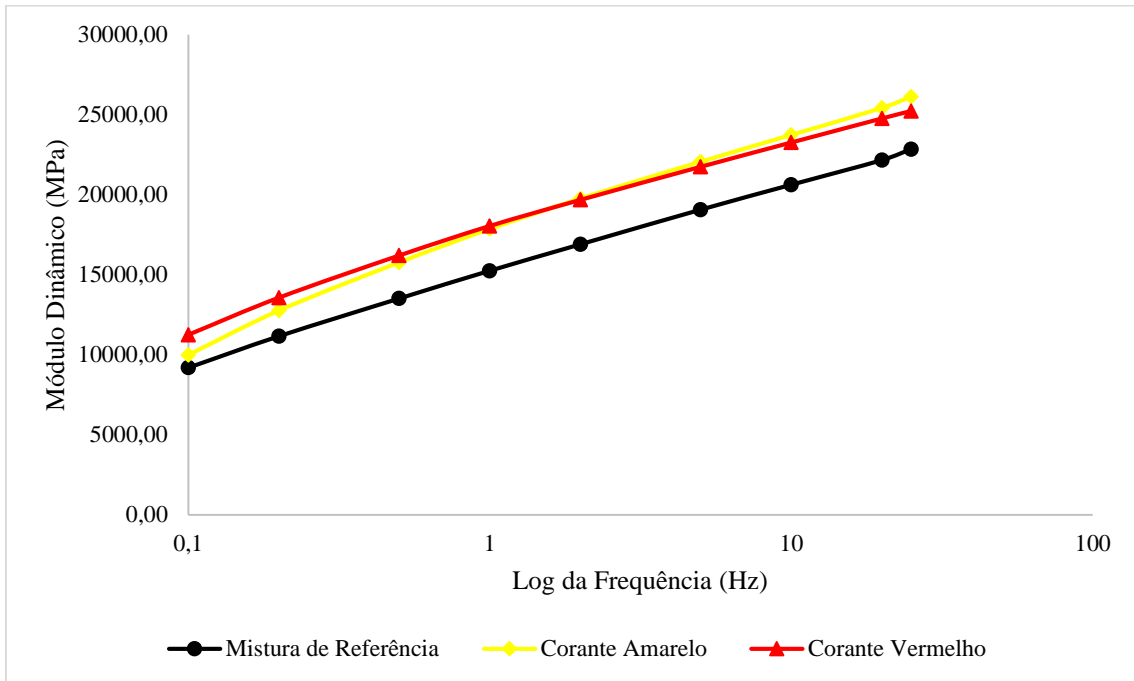


Figura 60 - Módulo dinâmico das misturas asfálticas (21,1°C)

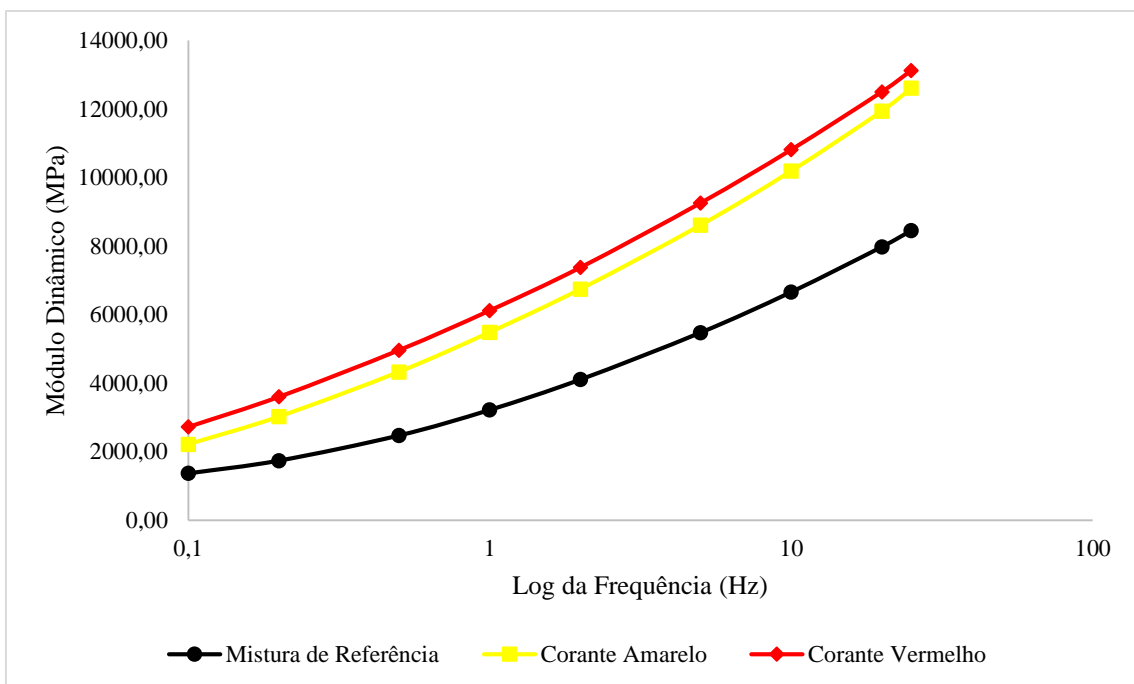
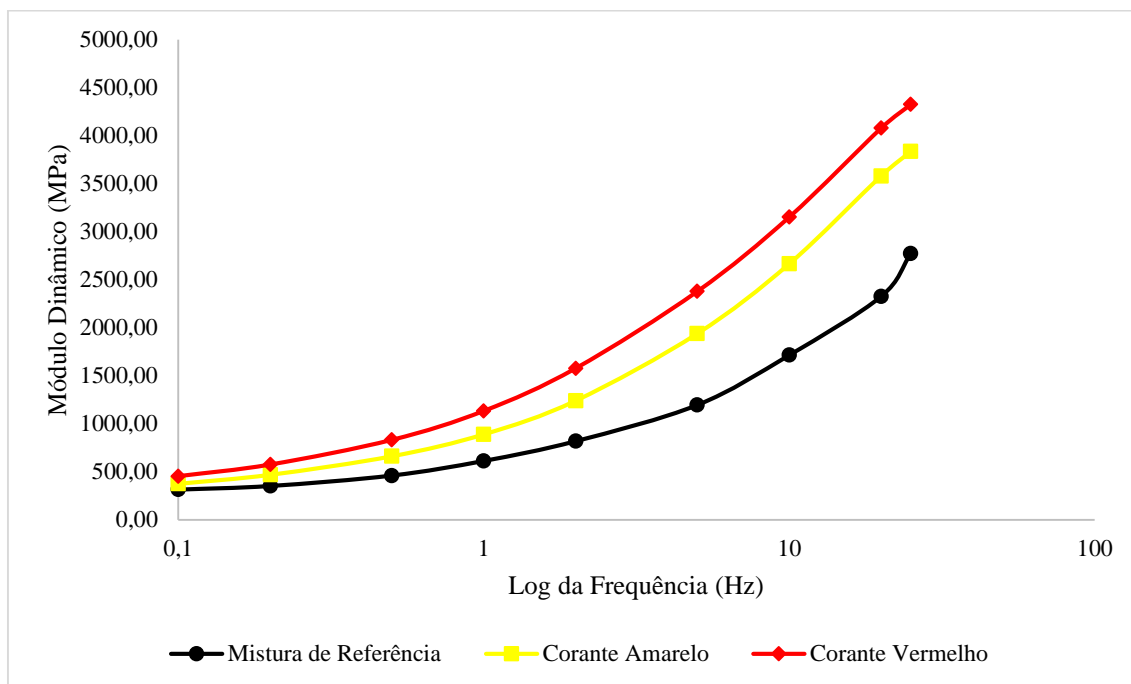


Figura 61 - Módulo dinâmico das misturas asfálticas (37,8°C)



Com os resultados foi possível observar o comportamento semelhante nas três temperaturas para as misturas com adição de corantes, com valores sensivelmente superiores para o corante vermelho nas temperaturas de 21,1°C e 37,8°C, enquanto que na temperatura menor este apresenta superioridade apenas nas menores frequências. Porém como houve um aumento da rigidez para as misturas modificadas foi possível verificar uma menor sensibilidade destas a variação de temperaturas, em relação a mistura de referência. Fato esse observado visivelmente em todas as Figuras, onde as amostras com corante amarelo e vermelho apresentaram valores superiores a mistura de referência.

A propriedade viscoelástica do material é determinada pelo ângulo de fase (diferença entre o pulso de tensão e o pulso de deformação), quanto maior for este ângulo maior será a viscosidade e menor a elasticidade. Do ensaio de módulo dinâmico foi possível obter também os gráficos que relacionam os ângulos de fase às frequências de ensaio para cada temperatura, conforme ilustram as Figura 62, Figura 63 e Figura 64.

Figura 62 - Ângulos de fase relativos às frequências de carregamento (4,4°C)

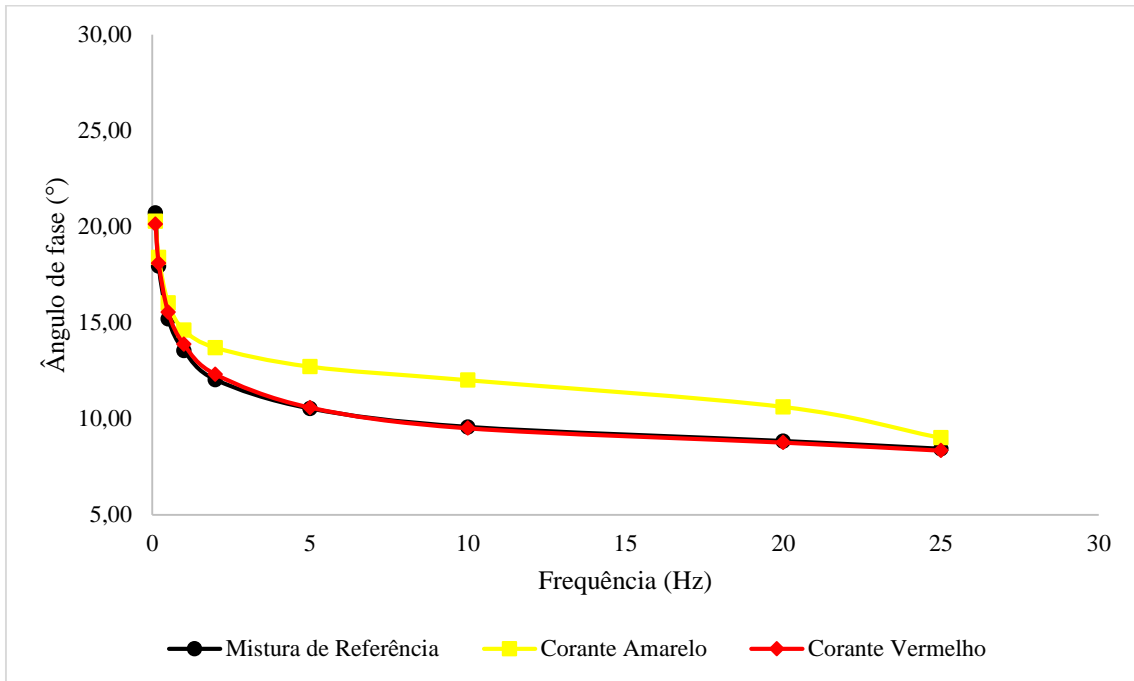


Figura 63 - Ângulos de fase relativos às frequências de carregamento (21,1°C)

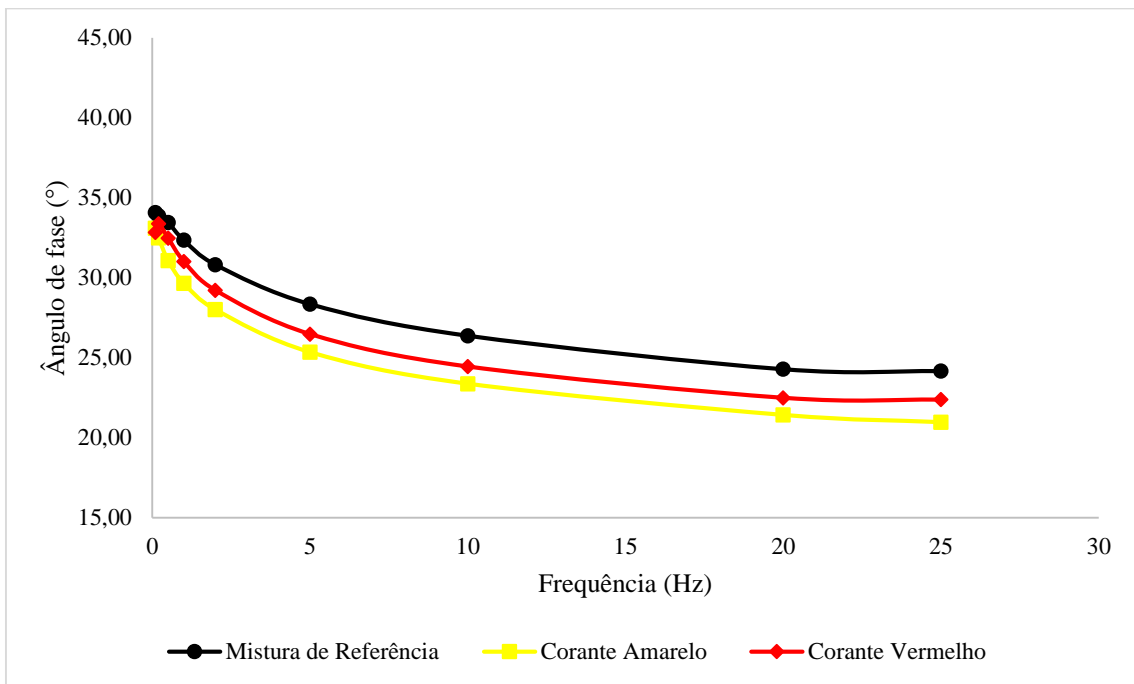
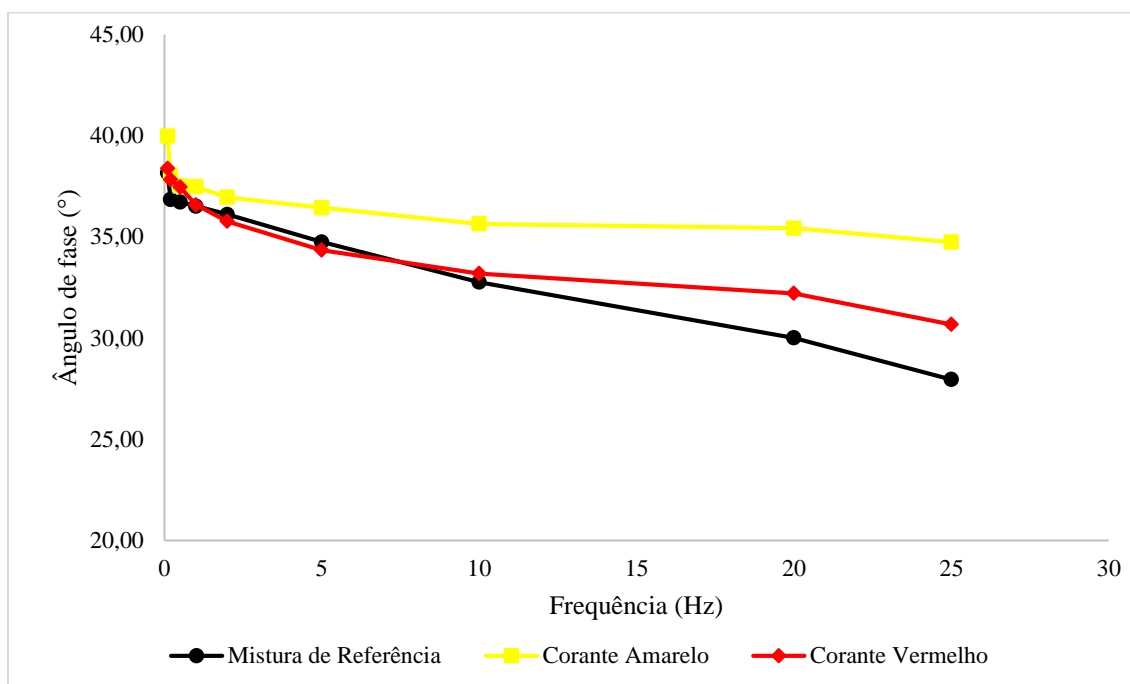


Figura 64 - Ângulos de fase relativos às frequências de carregamento (37,8°C)



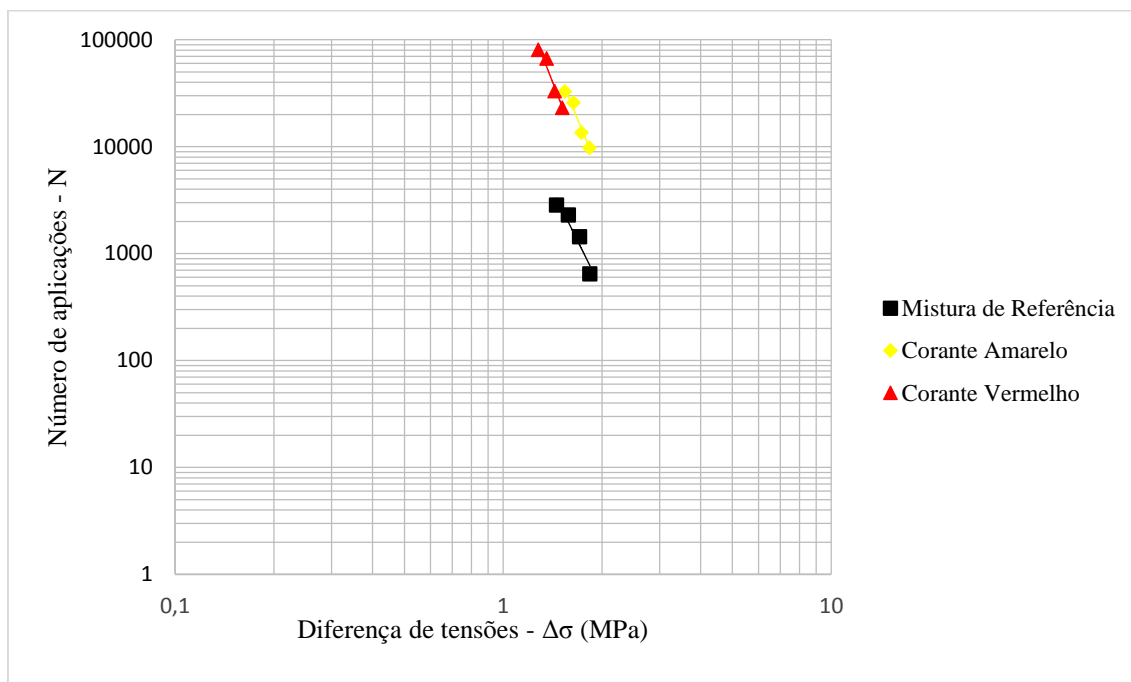
Para todas as misturas analisadas, observou-se que o ângulo de fase aumenta com o aumento da temperatura e diminui com o aumento da frequência. Para a menor e maior temperatura é observado que a mistura com o corante amarelo apresenta o maior ângulo de fase, ou seja, apresenta a maior viscosidade. No entanto, na temperatura intermediária de 21°C esta apresentou os menores valores e verificou-se os maiores resultados para a mistura de referência.

4.1.6 Ensaio de Vida de fadiga

Por meio da curva de fadiga é possível obter informações sobre a susceptibilidade do revestimento à aplicação de carregamentos cíclicos. Essa avaliação pode ser realizada com o coeficiente angular da reta (N_1), pois, quanto maior for a inclinação menor será a susceptibilidade do pavimento e consequentemente menor será o risco de a mistura sofrer trincamento precoce (CAVALCANTE, 2016; OTTO, 2009).

O ensaio de fadiga foi realizado com quatro níveis de tensões, variando de 30% a 50% da Resistência à Tração. A curva de vida de fadiga em função da diferença de tensão está na Figura 65.

Figura 65 - Curva de fadiga em função da diferença de tensões.



Para cada modelo da curva foi possível encontrar equações que melhor se adequaram as possíveis linhas de tendência, estando exposta na Tabela 18. Analisando os resultados verificou-se que todas as curvas obtiveram altos coeficiente de determinação (R^2), deixando em evidência a qualidade do ajuste dos modelos em relação aos pontos observados. A curva com a adição do corante amarelo foi a que apresentou o valor de R^2 mais próximo de 1, ou seja, menor dispersão, enquanto que a curva com a mistura de referência apresentou os menores coeficientes.

Tabela 18 - Modelo de fadiga em função da diferença de tensões

AMOSTRA	MODELO	R^2	K_1	N_1
Mistura de Referência	$N = 33509 (\Delta\sigma)^{-6,195}$	0,91	33509	6,195
Corante Amarelo	$N = 915919 (\Delta\sigma)^{-7,515}$	0,96	915919	7,515
Corante Vermelho	$N = 622303 (\Delta\sigma)^{-7,894}$	0,95	622303	7,894

O coeficiente angular da reta de fadiga da mistura (N_1) de referência é de 6,195, enquanto que este mesmo coeficiente, para as curvas com da mistura com adição de corante são 7,515 e 7,894 para o óxido de ferro amarelo e vermelho, respectivamente. Com base na Tabela 18 foi possível observar que a mistura com o aditivo na cor vermelha apresentou maior resistência a altas tensões, devido ao elevado valor de N_1 e maior sensibilidade à diferença de tensões.

Para classificar a vida de fadiga de misturas asfálticas em laboratório por meio dos gráficos de diferença de tensões alcançadas durante o ensaio, Morilha Júnior (2004) analisou os resultados em três níveis de diferença de tensões: nível baixo (0,5 MPa); nível médio (1,0 MPa) e nível alto (2,0 MPa). A Tabela 19 mostra essa análise nas misturas asfálticas ensaiadas.

Tabela 19 - Variação da vida de fadiga com o nível de diferença de tensões aplicado

AMOSTRA	MODELO	$\Delta\sigma = 0,5$ MPa	$\Delta\sigma = 1,0$ Mpa	$\Delta\sigma = 2,0$ Mpa
Mistura de Referência	$N = 33509 (\Delta\sigma)^{-6,195}$	$2,45 \cdot 10^7$	$3,35 \cdot 10^4$	$4,57 \cdot 10^2$
Corante Amarelo	$N = 915919 (\Delta\sigma)^{-7,515}$	$1,67 \cdot 10^8$	$9,16 \cdot 10^5$	$1,25 \cdot 10^4$
Corante Vermelho	$N = 622303 (\Delta\sigma)^{-7,894}$	$1,48 \cdot 10^8$	$6,22 \cdot 10^5$	$8,50 \cdot 10^4$

A mistura com adição do corante vermelho apesar de apresentar maior resistência a altas tensões com o elevado valor de N_1 também apresentou uma elevada sensibilidade à diferença de tensões. Com base nesses resultados ainda pode-se observar que as misturas com adição de corantes apresentaram uma melhor vida de fadiga em relação ao ligante de referência, porém também expressaram uma elevada sensibilidade em referência a variação de tensões.

Após analisada a diferença de tensões foram plotadas as curvas de fadiga em função da deformação resiliente específica (Figura 66). E assim como na primeira análise foi possível gerar equações que melhor se encaixaram as possíveis linhas de tendência, como mostra a Tabela 20.

Figura 66 - Curvas de fadiga em função da deformação resiliente específica.

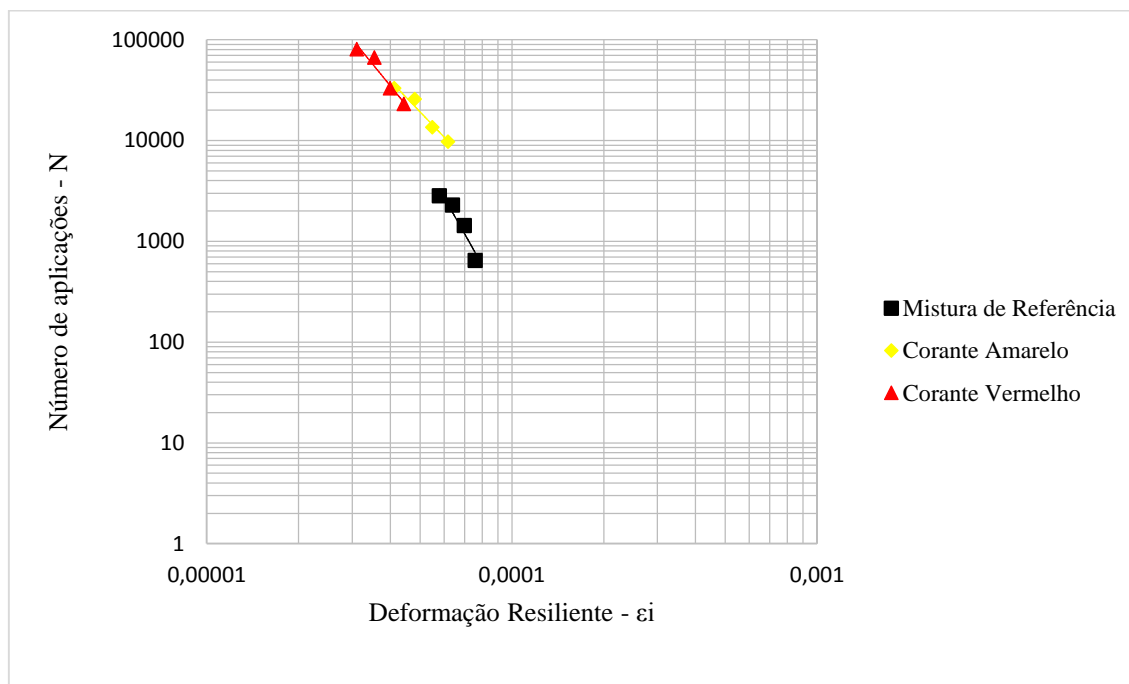


Tabela 20 - Modelo de fadiga em função da deformação resiliente específica

AMOSTRA	MODELO	R ²	K ₂	N ₂
Mistura de Referência	$N = 6.10^{-20}(\epsilon_i)^{-5,375}$	0,9127	6.10^{-20}	5,375
Corante Amarelo	$N = 5.10^{-10}(\epsilon_i)^{-3,164}$	0,9611	5.10^{-10}	3,164
Corante Vermelho	$N = 2.10^{-12}(\epsilon_i)^{-3,71}$	0,9455	2.10^{-12}	3,710

Assim como na análise em função da diferença de tensões, na deformação resiliente específica os parâmetros K₂ e N₂ representam os coeficientes do modelo e o coeficiente R² verifica a qualidade do ajuste das curvas. As curvas mostraram um comportamento diferente das curvas vida de fadiga x diferença de tensões. Nesse caso a mistura de referência, apresentou valor superior as amostras com adição de corantes. Diante disso, de acordo com Cavalcante (2016) para expor uma análise melhor adotou-se três níveis de deformações resilientes: nível baixo ($3. 10^5$ cm/cm), nível médio ($6. 10^5$ cm/cm) e nível alto ($1. 10^4$ cm/cm). Os resultados encontram-se na Tabela 21.

Tabela 21 - Variação da vida de fadiga com o nível de deformação resiliente

AMOSTRA	MODELO	$\Delta\epsilon_i = 3.10^{-5}$	$\Delta\epsilon_i = 6. 10^{-5}$	$\Delta\epsilon_i = 1.10^{-4}$
Mistura de Referência	$N = 6.10^{-20}(\epsilon_i)^{-5,375}$	$1,23.10^5$	$2,95. 10^3$	$1,90. 10^2$
Corante Amarelo	$N = 5.10^{-10}(\epsilon_i)^{-3,164}$	$1,02. 10^5$	$1,14. 10^4$	$2,26. 10^3$
Corante Vermelho	$N = 2.10^{-12}(\epsilon_i)^{-3,71}$	$1,20. 10^5$	$9,21. 10^3$	$1,38. 10^3$

De acordo com os resultados mostrados na Tabela 21, cada uma das amostras apresentou melhores respostas em determinado nível de deformação: no nível baixo merece destaque a mistura de referência que apresentou maior valor, no entanto esse aumento não foi tão expressivo já que todas as amostras obtiveram resultados semelhantes desse parâmetro em reduzida quantidade de deformação.

Verificando o nível médio, a mistura com corante amarelo foi a que se destacou, já que nesse caso houve uma diferença significativa para o ligante puro e um aumento menor em relação a mistura com o corante vermelho. Em altos nível de deformação a mistura com o corante amarelo mostrou resultados um pouco superiores ao corante vermelho e uma diferença maior em relação ao ligante asfáltico puro.

4.2 Avaliação da refletância das misturas asfálticas

As medições da refletância solar em campo das misturas asfálticas são mostradas na Tabela 22 e na Figura 67.

A medição da refletância foi realizada por três dias na semana, durante 3 meses em dias de sol, mediu-se, portanto, a quantidade de calor que era refletida e em seguida a quantidade de calor absorvida pela superfície. Após a leitura das medições realizadas nos 26 dias de coleta, foi feito a relação desses valores para obter o valor final do albedo, de acordo com a equação 5, (apresentada na página 72 deste trabalho), em seguida somou-se todos os valores obtidos para se ter o valor total de albedo e calcular a média para cada amostra (referência, corante amarelo e corante vermelho).

Tabela 22 - Resumo dos valores de Albedo das misturas asfálticas

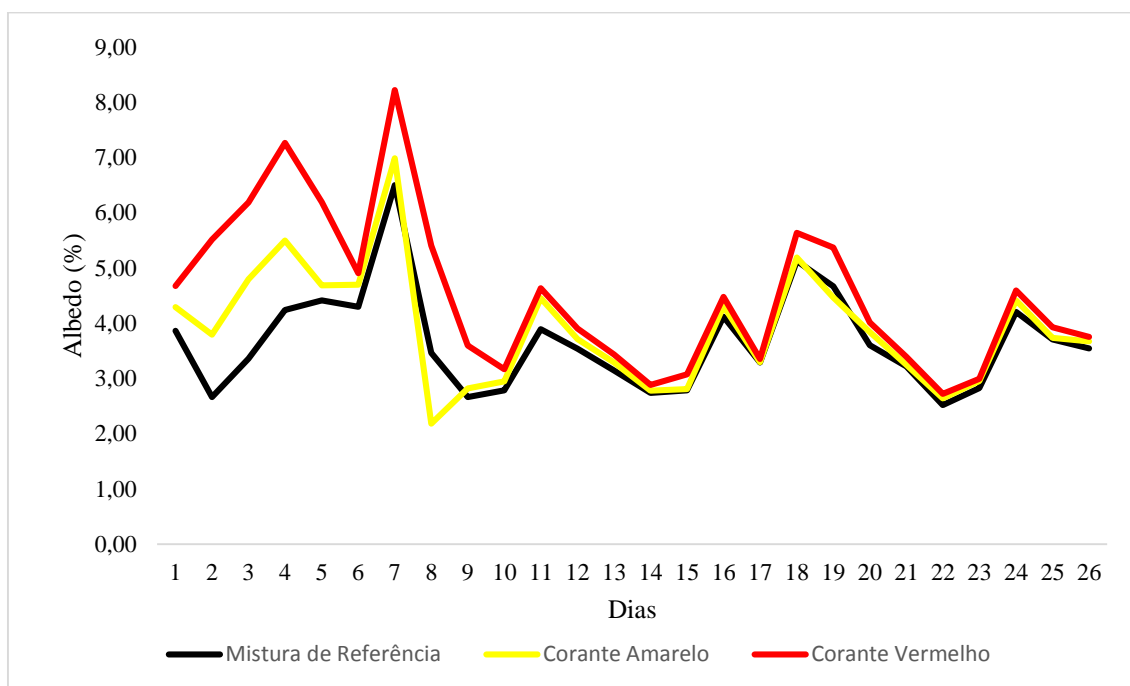
	Referência	Corante Amarelo	Corante Vermelho
ALBEDO TOTAL	95,18	101,51	117,30
MÉDIA DO ALBEDO	3,66	3,90	4,51

Pode-se perceber com base nos resultados obtidos a partir da medição do albedo, que mesmo que não fosse realizada a medição da temperatura superficial dessas amostras, com base apenas na medição do albedo seria possível perceber uma significativa mudança em valores percentuais (Tabela 23) de temperatura das superfícies em destaque, aumento esse superior a 18% quando comparado a superfície com coloração vermelha, já em comparação a amarela o valor obtido não apresentou uma diferença tão significativa, porém ainda ofereceu resultados mais favoráveis do que a mistura de referência, o que pode ser visto na tabela a seguir (Tabela 23).

Tabela 23 - Resumo da diferença dos valores de Albedo em (%) das misturas asfálticas

	Referência	Corante Amarelo	Corante Vermelho
MÉDIA DO ALBEDO	3,66	3,90	4,51
DIFERENÇA DE ALBEDO (%)	---	6,1%	18,8%

Figura 67 - Refletância solar das misturas asfálticas



As misturas asfálticas com adição dos pigmentos amarelo e vermelho apresentaram maiores valores de refletância solar em comparação a mistura de referência, o fato da superfície possuir cores mais claras favorece essa alta reflectância. Esse aumento corresponde a 6,1% para o corante amarelo e 18,8% para o corante vermelho, ambos em relação a mistura de referência.

Ao analisar as misturas com os dois tipos de aditivos foi verificado que o material com o pigmento amarelo, apesar de possuir cor mais clara que o vermelho, apresentou valores menores de albedo. Essa situação pode ter ocorrido devido a cor mais clara possuir dificuldade de mistura em contato com o CAP 50/70 que possui uma coloração muito escura.

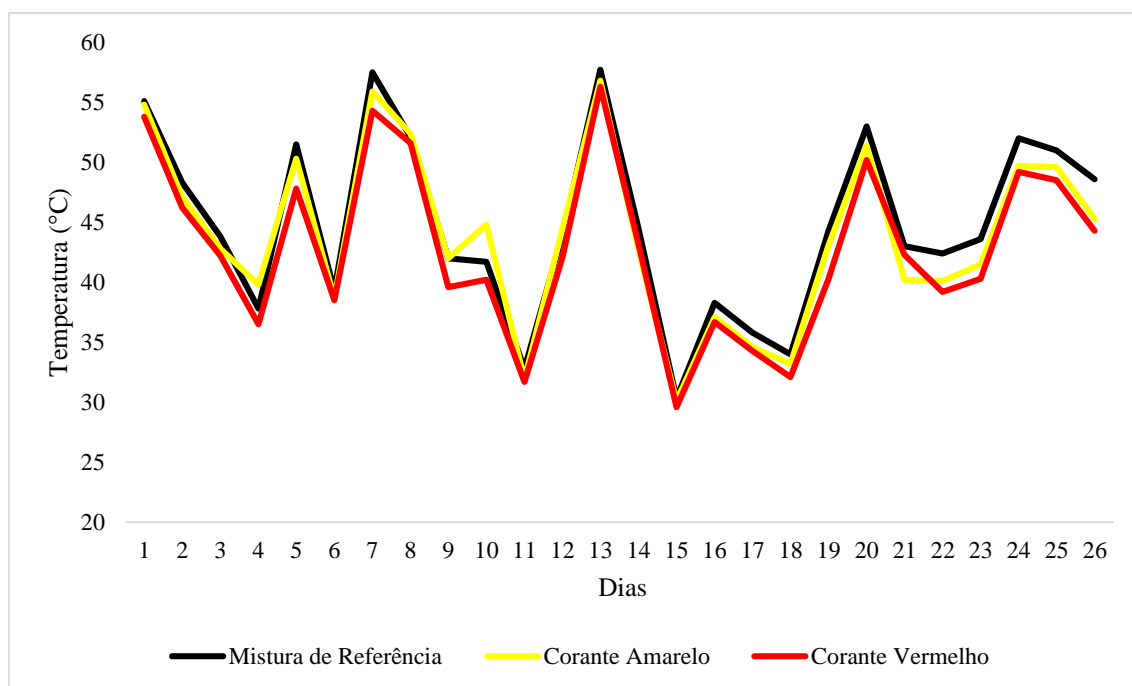
Del Carpio (2014) adicionou corantes de diferentes cores na mistura asfáltica e entre elas as cores amarela e vermelha encontrando valores de albedo superiores para o pigmento amarelo. No entanto, para a mistura com o pigmento amarelo foi utilizado um ligante albino que por ser translúcido permite um melhor desempenho do pigmento dentro da mistura e consequentemente apresenta maior reflectância que a mistura de referência.

Dessa maneira, o autor chegou à conclusão de que a cor do ligante influencia os resultados de reflectância solar das amostras e pode explicar o fato que na presente pesquisa os valores de albedo para o corante amarelo deram inferiores que mistura utilizando o corante vermelho.

4.3 Análise da Temperatura dos Revestimentos

Na Figura 68 encontra-se os resultados da medida de temperatura para cada dia nos horários entre 10:30 às 11:30 da manhã.

Figura 68 - Temperatura das misturas asfálticas



Ao analisar as misturas no período total de 3 meses, de 4 de fevereiro a 4 de abril de 2019, onde foram realizadas medições em 26 dias de céu limpo e sem nuvens, na figura acima (Figura 68) é possível verificar que as maiores temperaturas foram encontradas para a mistura de referência, com um pico de 57,7°C, verifica-se também que as temperaturas com o pigmento vermelho foram inferiores as misturas com corante amarelo.

Essa situação já era esperada, visto que, a temperatura medida está relacionada principalmente com a cor dos revestimentos, onde os maiores refletivos apresentam menores temperaturas (DEL CARPIO, 2014) e na presente pesquisa a mistura com adição de corante vermelho apresentou valores de albedo superiores.

As médias das temperaturas para os 26 dias de medição foram as seguintes: 42,0°C para a mistura com a adição do corante vermelho, 43,9°C para a mistura com corante amarelo e 44,7°C para a mistura de referência. Portanto foi possível obter uma diferença de 2,7°C quando comparamos a mistura de referência com a mistura de coloração vermelha. Para a coloração amarela obteve uma redução da temperatura comparado a mistura de referência, porém menos significativa, de menos de 1°C.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi observado que a incorporação do óxido de ferro nas misturas asfálticas em questão, teve grande influência tanto nas propriedades mecânicas quanto na redução da temperatura superficial e no aumento da refletividade dessas superfícies.

As maiores temperaturas foram encontradas para a mistura de referência, com um pico de 57,7°C, obteve-se uma redução de temperatura de até 2,7°C para mistura com corante vermelho quando comparado a mistura de referência, já a mistura de coloração amarela não obteve resultados significantes.

Com relação ao aumento e diminuição do albedo obteve resultados satisfatórios para as misturas com adição do óxido de ferro em relação a mistura de referência, destacando-se ainda um melhor aumento no albedo para superfície com coloração vermelha de 18,8% comparado a mistura de referência, isso se deve ao fato de superfícies com cores mais claras favorecem o aumento da refletância.

Outro fator interessante, foi que o corante amarelo apesar de possuir cor mais clara que o vermelho, este apresentou valores menores de albedo, devido a cor mais clara possuir dificuldade de mistura em contato com o betume, o qual, possui uma coloração muito escura.

Com relação a análise mecânica foi possível concluir que as misturas asfálticas com adição do óxido de ferro apresentaram aspectos positivos, evidenciando uma maior resistência à tração e à ruptura, proporcionando melhor desempenho a mistura asfáltica. A incorporação dos pigmentos também foi importante para o aumento da resistência a deformação permanente, visto que, as misturas com corantes podem ser utilizadas em zonas de tráfego pesado, enquanto que, a mistura de referência pode ser utilizada apenas em zonas de tráfego padrão.

Já para o ensaio de lottman modificado, houve uma redução da resistência a ação deletéria da água, o que evidencia a falta de adesividade das misturas, porém, vale salientar que que nem a mistura de referência obteve resultados satisfatórios, podendo este ter sido o problema para as baixas respostas mecânicas das misturas com adição do óxido, este problema poderia ser resolvido com a adição de DOPE.

Houve também aumento significativo para vida de fadiga e módulo dinâmico para as misturas com adição do óxido de ferro, visto que como o óxido se comporta como filler, o mesmo atua aumentando a resistência mecânica das superfícies asfaltadas, o que viabiliza a indicação do uso do corante nas superfícies asfaltadas.

5.1 Sugestões para pesquisas futuras

- Avaliar misturas asfálticas com óxido de ferro produzidas com aditivo melhorador de adesividade;
- Avaliar misturas asfálticas, produzidas com a adição do óxido de ferro em outras colorações, com o intuito de aumentar ainda mais o valor do albedo;
- A utilização das misturas de referência e com a adição do óxido de ferro em trechos experimentais evidenciando os resultados encontrados em laboratório;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCANTARA, P. S. X.; NÓBREGA, A. C. V.; MOURA, L. S. **Influência dos pigmentos de óxido de ferro nas propriedades da pasta de cimento.** In: 21º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 21. Cuiabá. p. 3224 - 3233. 2014.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIALS - **AASHTO T 283: Standard Method Of Test For Resistance Of Compacted Asphalt Mixtures To Moisture-Induced Damage.** Washington, D.C., 2014.

ANP Nº 19. **Regulamento Técnico para Realização dos Investimentos em Pesquisa e Desenvolvimento e Elaboração do Relatório Demonstrativo.** Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16505: Misturas asfálticas - Resistência à deformação permanente utilizando o ensaio uniaxial de carga repetida.** Rio de Janeiro. 2016.

ASTRALL. O óxido de ferro natural. Disponível em: <http://www.astrallquimica.com.br>. Acesso em: 11 de abril de 2017.

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

BARCELLOS, C. et al. Mudanças climáticas e ambientais e as doenças infecciosas: cenários e incertezas para o Brasil. **Epidemiol. Serv. Saúde**, Brasília, v. 3, n. 18, p.01-20, jul. 2009.

BERNUCCI L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI J. A. P., SOARES J. B. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros.** 1ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2007. 501p.

BIAS, E. S.; BAPTISTA, G. M. M.; LOMBARDO, M. A. **Análise Do Fenômeno De Ilhas De Calor Urbanas, Por Meio Da Combinação De Dados Landsat E Ikonos.** Belo Horizonte. p. 1 - 8. 2003.

BLAKE, R. L., HESSEVICK, R. E., ZOLTAI, T., FINGER, L. W., Refinement of the hematite structures. **American Mineralogist**, Vol. 51, p. 123-129, USA, 1966

BROWN, E. R., KANDHAL, P. S., ROBERTS, F. L., KIM, Y. R., LEE, D., KENNEDY, T. W. **Hot mix asphalt materials, mixture design and construction.** 3 ed. 2009.

BULATOVIC, V. O.; REK, V.; MARKOVIC, J. Rheological Properties of Bitumen Modified with Ethylene Butylacrylate Glycidylmethacrylate. **Polymer Engineering & Science**, v. 54, n. 5, p. 1056–1065, 2014.

CARDOZO, F. S.; PEREIRA, G.; SILVA, F. B.; SHIMABUKURO, Y. E.; MORAES, E. C. **Análise da estimativa da refletância e albedo em áreas alagadas do Pantanal**. Anais 2º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Corumbá, Embrapa Informática Agropecuária/INPE, p.392- 401, 2009.

CARNIELO, E.; ZINZI, M. Optical and Thermal Characterisation of Cool Asphalts to Mitigate Urban Temperatures and Building Cooling Demand. **Building and Environment**. v. 60, p. 56-65, 2013.

CAVALCANTE, F. P. **Efeito da adição dos óleos de ricinus communis elinus usitatissimum nas propriedades reológicas do cimento asfáltico de petróleo puro e modificado**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

CRAVO, M. C. C. **Efeitos do envelhecimento térmico e fotoquímico em ligantes asfálticos, mástique e matriz de agregados finos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

DAS, S., HENDRY, M.J. Changes of crystal morphology of aged goethite over a range of pH (2–13) at 100°C. **Applied Clay Science** **51**, 192–197. 2011.

DEL CARPIO, J. A. V. **Uso De Pigmentos De Óxidos De Metais Mistos Na Pavimentação Para A Mitigação Da Ilha De Calor Urbana**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **DNIT 095/2006 – EM: Cimentos Asfálticos de Petróleo – Especificação de material**. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **DNIT – ME 031/06. Pavimentos Flexíveis - Concreto Asfáltico - Especificação De Serviço**. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **DNIT. Manual de Pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2006.

FIALHO, E. **Ilha de calor em cidade de pequeno porte: caso de Viçosa, na zona da mata mineira**. Tese (Doutorado em Geografia Física). Faculdade de Filosofia Letras e Ciências Humanas. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.

FONTENELE, H. B., **Representação Do Tráfego De Veículos Rodoviários De Carga Através De Espectros De Carga Por Eixo E Seu Efeito No Desempenho Dos**

Pavimentos. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo - USP. São Carlos, SP. 2011.

GAMA, D. A. **Utilização do Etileno Acetato de Vinila (EVA) descartado pela indústria calçadista em misturas asfálticas.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Campina Grande, PB. 2013.

GAMA, D. A. **Efeito da Adição de Polímeros Reativo, Não-Reativo e Ácido Polifosfórico e Suas Combinações nas Propriedades de Ligantes Asfálticos.** 2016. 167 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

GAMA, D. A.; YAN, Y.; RODRIGUES, J.K.G.; ROQUE, R. Optimizing the use of reactive terpolymer, polyphosphoric acid and high-density polyethylene to achieve asphalt binders with superior performance. **Construction and Building Materials**, v. 169, p. 522-529. 2018.

GHIDIN, A.A., MELO, V.F., LIMA, V.C., LIMA, J.M.J.C. 2006. **Topossequências de latossolos originados de rochas basálticas no Paraná.** I – Mineralogia da fração argila. R. Bras. Ci. Solo, 30:293-306.

JOSÉ JÚNIOR; DANTAS, M. Análise do albedo da superfície e índices de vegetação por sensoriamento remoto na bacia hidrográfica do rio Pacoti/CE. **Revista Tecnologia.** v. 39, n. 2, p.1-18, 19 dez. 2018. Fundacao Edson Queiroz.

KENNEDY, T. W.; HUBER, G. A.; HARRIGAN, E.; HUGHES, C. S.; QUINTUS, H, V.; MOULTHROP, J. S. Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave) - **The Product of the SHRP Asphalt Research Program.** Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington, DC. 1994.

KLEIN, C. **Mineral Science**, 2ª edição, New York, p.380-382, 2001.

KRÜGER, E. L.; GONZALEZ, D. E. G. Impactos da alteração no albedo das superfícies no microclima e nos níveis de conforto térmico de pedestres em cânions urbanos. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 3, p.89-106. 2016.

LOPES, R. J.; FIORAVANTI, C. **Ondas de calor** Reinaldo José Lopes e Carlos Fioravanti. Pesquisa Fapesp, São Paulo, v. 27, n. 262, p.01-04, nov. 2017.

LUCENA, A. J. **O campo térmico na zona oeste do Rio de Janeiro: uma contribuição ao estudo do clima urbano.** Dissertação (Mestrado em Geografia). Programa de Pós-Graduação em Geografia da UERJ, Rio de Janeiro, 2005.

LUCENA, L. C. F. L. **Verificação da influência do uso de resíduos industriais como filler em misturas asfálticas sob o efeito da presença d'água.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Campina Grande, 2009.

MAGALHÃES, F. **Síntese e Caracterização de Óxidos de Ferro e Compósitos para Aplicações no Tratamento Redox de Efluentes Aquosos.** Tese (Doutorado). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

MASCE, P. E.; SAEED, M.; AHMED, P. E.; MASCE, A. Performance evaluation of Elvaloy as a fuel resistant polymer in asphaltic concrete airfield pavements. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 10. 2017.

MELO, V. F., FONTES, M. P. F.; NOVAIS, R. F.; SINGH, B.; SCHAEFER, C. E. G. R. Características dos óxidos de ferro e de alumínio de diferentes classes de solos. **R. Bras. Ci. Solo**. v. 25, p. 19-32. 2001.

MELO, J. V. S. et al. **Deformação Permanente De Misturas Asfálticas Com Pigmentos De Óxidos Metálicos Mistos.** In: EXPOPAVIMENTAÇÃO, 4. Foz do Iguaçu, SC. p. 1 - 14. 2015.

MIRZAEI, P.; HAGHIGHAT, F. Approaches to study Urban Heat Island – Abilities and limitations. **Building and Environment**, v. 45, n. 10, 2010. p. 2192–2201. 2010.

MORILHA JUNIOR, A. **Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

MOTA, J. C. A., ASSIS JÚNIOR, R. N., AMARO FILHO, J., ROMERO, R. E., MOTA, F. O. B., LIBARDI, P. L. Atributos mineralógicos de três solos explorados com a cultura do melão na Chapada do Apodi – RN. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 31, p. 445-454. 2007.

MUROLO, J. P. **Análise Do Desempenho De Inibidor De Corrosão Na Armadura De Estruturas De Concreto.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Universidade São Francisco, Itatiba, 2007.

NASCIMENTO, L. A. H. **Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

OKE, T. R. **Boundary Layer Climates.** Londres, 2002.

OLIVEIRA, D. O.; ALVALÁ, R.C.S. **Observational evidence of the urban heat island of Manaus City**. Brazil. Meteorological Applications. 2012.

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

PAVÃO, V. M.; QUERINO, C. A. S.; BENEDITTI, C. A. Temperatura E Albedo Da Superfície Por Imagens Tm Landsat 5 Em Diferentes Usos Do Solo No Sudoeste Da Amazônia Brasileira. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 16, p.169-183. Mato Grosso, 2015.

PILLAR, V.D. **Clima e vegetação**. UFRGS, Departamento de Botânica., 1995.

ROSENFELD, A. Cool communities: strategies for heat island mitigation and smog reduction. **Energy and Buildings**, Londres, v.28, p.51-62. 1998.

SALES, P. M. **Avaliação Das Características Físicas E Mecânicas De Misturas Asfálticas Modificadas Com Adição Do Ccbit**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015.

SANTOS, K. P. **Estudo Da Incorporação De Argilas Montmorilonitas Como Modificador Em Cimentos Asfálticos De Petróleo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

SANTOS, N. S.; RODRIGUES, J. K. G.; MENDONÇA, A. M. G. D. Efeito da adição de lignina kraft proveniente da madeira de eucalipto na reologia do CAP 50/70. **Matéria**, v. 23, n. 3. Rio de Janeiro, RJ. 2018.

SILVA, A. H. M. **Avaliação do comportamento de pavimentos com camada reciclada de revestimentos asfálticos a frio com emulsão modificada por polímero**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

SILVA, J. P. S. **Avaliação dos efeitos de produtos rejuvenescedores em misturas asfálticas**. (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade de Brasília. Brasília, DF. 2011.

SOBREIRO, F. **Efeito Da Adição De Ácidos Fosfóricos No Comportamento Reológico De Ligantes Asfálticos Puros E Modificados Com Copolímero SBS**. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

TREMOCOLDI, W.A. Mineralogia dos silicatos e dos óxidos de ferro da fração argila de solos desenvolvidos de rochas básicas no estado de São Paulo. **Rev. Biociências**. Taubaté, v.9, n.1, p.15-22. 2003

TRICHÊS, G. **Mistura asfálticas coloridas e a ilha de calor urbano**. Boletim Técnico do Sindicato da Construção Pesada do Estado de São Paulo. São Paulo, n.3, 2014.

WECHSLER B. A., LINDSLEY D. H., PREWITT C. T., American Mineralogist, Crystal structure and cation distribution in titanomagnetites ($\text{Fe}_{3-x}\text{Ti}_x\text{O}_4$), **MT100-1350**, volume 69, p.754-770, 1984.

WERNECK, D. R. **Estratégias De Mitigação Das Ilhas De Calor Urbanas: Estudo De Caso Em Áreas Comerciais Em Brasília - DF**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

YAN, K.; HE, W.; CHEN, M.; LIU, W. Laboratory investigation of waste tire rubber and amorphous poly alpha olefin modified asphalt. **Construction and Building Materials**, v. 129, p. 256-265. 2016.