



**UFAM**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS**



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM  
AGREGADO SINTERIZADO DE ARGILA MODIFICADAS POR  
NANOMATERIAL DE MULTICAMADAS DE GRAFENO**

**ALINE MAGALHÃES CABRAL**

MANAUS

2017

**ALINE MAGALHÃES CABRAL**

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM  
AGREGADO SINTERIZADO DE ARGILA MODIFICADAS POR  
NANOMATERIAL DE MULTICAMADAS DE GRAFENO**

Dissertação apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação em  
Ciência e Engenharia de Materiais,  
como requisito parcial para obtenção  
do título de Mestre em Ciência e  
Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Hidembergue Ordozgoith da Frota

MANAUS

2017

**ALINE MAGALHÃES CABRAL**

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM  
AGREGADO SINTERIZADO DE ARGILA MODIFICADAS POR  
NANOMATERIAL DE MULTICAMADAS DE GRAFENO**

Dissertação apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação em  
Ciência e Engenharia de Materiais,  
como requisito parcial para obtenção  
do título de Mestre em Ciência e  
Engenharia de Materiais.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof. Dr. Hidembergue Ordozgoith da Frota (Orientador)**  
**Universidade Federal do Amazonas**

---

**Prof.<sup>a</sup> Dr. Marcos Marques da Silva Paula**  
**Universidade Federal do Amazonas**

---

**Prof. Dr. Estevão Monteiro de Paula**  
**Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia**

## **DEDICATÓRIA**

A Deus, o maior de todos! Dedico o trabalho também a minha avó, Helena (in memoriam), aos meus pais, Neide e Antonio Neto, minha irmã, Alaíse e principalmente ao meu marido, Raimundo Netto, pelos incentivos e principalmente pelo amor.

## **AGRADECIMENTOS**

Prioritariamente gostaria de agradecer a Deus, inteligência suprema, causa primeira de todas as coisas. Por sempre estar presente na minha vida, nos momentos de felicidade e de tristeza, sempre me guiando pelo melhor caminho. Se hoje posso regozijar-me com essa vitória e por tantas outras, devo ser muito grata por Ele ter sempre agido muito bem na minha vida, auxiliando-me nas minhas decisões mais difíceis.

Ao meu marido, Raimundo Netto, devo muito por esse momento tão feliz, pois foi o idealizador, influenciador e maior apoiador desse longo processo do Mestrado. Talvez se não fosse o seu incentivo, jamais buscaria por esse título, mas ele foi persistente, sempre com muito amor, carinho e persuasão acabou me convencendo que esse seria um grande passo na minha vida profissional, algo que estava totalmente certo. Meu amor, obrigada pela ajuda no laboratório, nos finais de semana, feriados, madrugadas, pelo esforço em sempre me auxiliar nessa missão que mesmo sendo tão importante, não tem sido fácil. Sou muito grata por todo o esforço que você fez durante toda essa nossa caminhada em um novo estado, diferente dos nossos de origem, em busca de novas oportunidades e crescimento profissional, para que pudéssemos ser muito felizes juntos.

A minha mãe, Neide, pai, Antônio Neto, irmã Alaíse, tio Nilton, padrinho Neivan sou grata pela confiança e orgulho que sempre depositaram em mim. Sentimentos pelos quais sempre me fizeram lutar cada vez mais em busca dos meus objetivos, mesmo quando o coração apertava, a saudade mais ainda e a vontade de fraquejar era quase inevitável. Os momentos difíceis foram muitos, longe de todos, com uma mudança radical na vida, não apenas geográfica, mas acima de tudo, na vida profissional. Mas a sensação de proporcionar à minha família orgulho, por estar buscando um título tão importante, só me deixava mais e mais forte. Família, obrigada pelas boas vibrações!

Não poderia deixar de agradecer com todo o meu coração à minha família manaura, Cláudia Barbosa, minha grande amiga, mãe e irmã que conquistei pelas bandas daqui, tão longe da minha cidade natal, mas que me deu um suporte que jamais poderia imaginar receber de alguém. Auxiliou-me nos ensaios, nas dicas, me ensinou boa parte do que sei hoje do laboratório de Pavimentação Asfáltica. Muito

obrigada, Cláudia, você é muito importante nessa conquista! Dessa família manaura, há ainda a Profa. Consuelo Frota que me acolheu como se eu fosse uma filha, prestando-me todo o auxílio necessário para o andamento da pesquisa e principalmente o carinho, a preocupação, nos momentos que mais precisei, juntamente com o meu orientador, Prof. Hidembergue Frota, mostram-se educadores exemplo que eu jamais poderia imaginar existir. Sou muito grata aos senhores, Profa. Consuelo Frota e Prof. Hidembergue Frota!

É meu desejo também agradecer a todos os membros do Grupo de Pesquisa do GEOTEC, principalmente ao Cláudio de Paula, por ter me prestado auxílio em diversas situações, no laboratório, nas disciplinas, não tenho palavras para demonstrar a minha gratidão a você. Ao aluno Roberto Rosselini também sou grata pela disponibilidade em ajudar sempre que possível e a todos os demais membros do grupo pela união e a presteza. Além disso, gostaria de agradecer à funcionária do GEOTEC Rose, pela delicadeza e disponibilidade em sempre ajudar. Obrigada GEOTEC!

## RESUMO

Estudou-se o comportamento mecânico de misturas asfálticas do tipo Concreto Asfáltico (CA), com o emprego de Agregado Sinterizado de Argila Calcinada (ASAC) como agregado graúdo, modificada por nanomaterial de multicamadas de grafeno, e o efeito do envelhecimento das amostras no desempenho mecânico. Teve-se como intuito a análise da performance mecânica desse agregado alternativo, o impacto da adição do nanomaterial de multicamadas de grafeno nas misturas asfálticas a serem utilizadas em obras de pavimentação asfáltica no Município de Manaus, e também demonstrar a importância do envelhecimento nesse processo. Participaram desse compósito asfáltico, o ligante asfáltico 50/70, comercializado na Região Amazônica, a areia Manaus, como agregado miúdo, e o cimento Portland, utilizado como filer. Todos esses materiais foram caracterizados fisicamente, com as dosagens estabelecidas de acordo com a SUPERPAVE. Foram analisados os seguintes materiais: 1) mistura referência (sem utilização de multicamadas de grafeno e envelhecida); 2) mistura com multicamadas de grafeno envelhecida; 3) mistura sem as multicamadas de grafeno e não envelhecida. Determinou-se o desempenho mecânico desses compósitos de acordo com os ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT) e Módulo de Resiliência (MR). Nos testes de RT os corpos de prova dos três tipos de misturas foram submetidos às temperaturas de 25°C, 40°C e 60°C. Para o caso do MR, em particular, estudou-se o comportamento mecânico às temperaturas de 25°C e 40°C. Os resultados mostraram que no ensaio de Resistência à Tração, houve incremento nos valores de RT com a adição do grafeno nas temperaturas de 25°C e 40°C. No que concerne a mistura de referência, os valores obtidos de RT superaram o mínimo estabelecido por norma e a mistura não envelhecida não obteve resultados dentro do mínimo necessário. Desse modo, os compósitos envelhecidos (referência e grafeno) atendem às exigências técnicas, notando-se aumento do desempenho mecânico com a adição das multicamadas de grafeno às misturas envelhecidas, cerca de 9,8% a 25°C e 8,1% a 40°C. O envelhecimento confere às misturas 63% de aumento da RT em relação às não envelhecidas à 25°C, 97% à 40°C e 50% a 60°C. No tocante ao Módulo de Resiliência, os ensaios demonstraram que houve incremento nos seus valores para mistura com a adição do nanomaterial grafeno e para as três misturas há manutenção de valores, com a variação da porcentagem da

RT, o que significa que todos os compósitos estudados são pouco susceptíveis à variação da temperatura, com resistência mecânica satisfatória. Verifica-se que o agregado ASAC possui viabilidade técnica para ser empregado na pavimentação asfáltica, que o nanomaterial de multicamadas de grafeno mostra-se como material modificador promissor nesse ramo e que o processo de envelhecimento é essencial na execução das misturas asfálticas.

**Palavras-chave:** Agregado Sinterizado de Argila Calcinada, Multicamadas de Grafeno, Envelhecimento, Resistência à Tração por Compressão Diametral, Módulo de Resiliência.



## ABSTRACT

The mechanical behavior of asphalt mixtures of the Asphalt Concrete (CA) type was studied with the use of Calcined Clay Sintered Aggregate (ASAC), as a coarse aggregate, modified by graphene multilayer nanomaterial, and the effect of the samples aging on the mechanical performance. The purpose of this study was to analyze the mechanical performance of this alternative aggregate, the impact of the addition of graphene multilayer nanomaterials in the asphalt mixtures to be used in asphalt paving works in the city of Manaus, and also to demonstrate the importance of the aging in this process. In the composition of the CA were used the 50/70 asphalt binder, commercialized in the Amazon Region, the Manaus, sand as a fine aggregate, and the Portland cement, as the filler. All of these materials were physically characterized according to SUPERPAVE. The following materials were analyzed: 1) the reference mixture (without use of graphene multilayers and aged); 2) mixture with graphene multilayers aged, and 3) mixture without the graphene multilayers and unaged. It was determined the mechanical performance of these composites according to the Diametral Compressive Tensile Strength (RT) and Resilience Modulus (MR) tests. In the RT tests, the specimens of the three types of mixtures were subjected to temperatures of 25 °C, 40 °C and 60 °C. For MR, in particular, the mechanical behavior was studied at temperatures of 25 °C and 40 °C. The results showed that in the tensile strength test, there was an increase in RT values with the addition of graphene at temperatures of 25 °C and 40 °C. As far as the reference mixture is concerned, the values obtained from RT exceed the minimum set by the standard, and the unaged mixture did not obtain that minimum. Thus, the aged composites (reference material and graphene) meet the technical requirements, with increasing the mechanical performance with the addition of graphene multilayers to the aged blends, about 9.8% at 25 °C and 8.1% at 40 °C. Aging gives mixtures a 63% increase in RT compared to the unripe at 25 °C, 97% at 40 °C and 50% at 60 °C. Regarding the Resilience Modulus, the tests showed that there was an increase in MR values, in the mixture with the addition of graphene nanomaterial and, for the three mixtures, there is maintenance of values, with the variation of the percentage of RT, which means that all composites studied are not very susceptible to temperature variation, with satisfactory mechanical resistance. It

is demonstrated, therefore, that the ASAC aggregate has technical feasibility to be used in asphalt paving, that the multilayer nanomaterial of graphene shows itself as promising modifying material in this field, and that the aging process is essential in the execution of the asphalt mixtures.

**Keywords:** Sintered Aggregate of Calcined Clay, Graphene Multilayer, Aging, Tensile Strength by Diametral Compression, Resilience Module.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Manaquiri/ AM- BR 174

Figura 2: BR 319

Figura 3: Classificação dos estados dos trechos no Estado do Amazonas

Figura 4: Representação em escala de nanopartículas

Figura 5: Nanotubos de carbono

Figura 6: Ilustração do grafeno

Figura 7: Ilustração da evolução de dimensões diferentes de asfalto

Figura 8: Representação de Nanoplaqueta de grafeno (GNP):

Figura 9: Estrutura Típica do pavimento flexível

Figura 10: Pontos de Controle para seleção granulométrica Superpave TMN 12,5mm

Figura 11: Fluxograma da Metodologia

Figura 12: CAP 50/70 em aquecimento

Figura 13: Amostra SUC

Figura 14: Inserção da Amostra em silo com auxílio de pá carregadeira (Esquerda) / Amostra sendo introduzida no triturador (Direita)

Figura 15: Secagem dos tijolos em sistema de túnel (direita) / ASAC obtido após britagem (esquerda)

Figura 16: Agregado ASAC antes do fracionamento

Figura 17: Agregado ASAC SUC (Após o fracionamento)

Figura 18: Areia Manaus

Figura 19: Moinho de alta energia

Figura 20: Grafite antes da moagem

Figura 21: Grafite após 4h de moagem

Figura 22: Preparo Corpo de Prova de Concreto Asfáltico com ASAC

Figura 23: Compactador Giratório SUPERPAVE

Figura 24: Ensaio de Resistência à Tração na UTM 14

Figura 25: Fluxograma adotado para o ensaio de Resistência à Tração

Figura 26: Ensaio de Módulo de Resiliência na UTM 14

Figura 27: Fluxograma adotado para o ensaio de Módulo de Resiliência

Figura 28: Ensaio de Penetração

Figura 29: Difratoograma Nanomaterial de multicamadas de grafeno

Figura 30: Difratoograma diversos tipos de moagem

Figura 31: Curva Granulométrica da Mistura com ASAC

Figura 32: Ensaio de Módulo de Resiliência à 40°C (Esquerda) / Aferição de temperatura após ensaio de Resistência à Tração à 40°C (Direita)

Figura 33: Ensaio de Resistência à Tração à 60°C (Esquerda) / Após ensaio de Resistência à Tração à 60°C

Figura 34: Gráfico de Resistência à Tração (Amostra de Referência e Amostra Grafeno)

Figura 35: Gráfico de Acréscimo de Resistência à Tração com a adição de Nanomaterial Grafeno

Figura 36: Gráfico de Decréscimo de Resistência à Tração com a Temperatura (Amostra de Referência e Amostra Grafeno)

Figura 37: Gráfico comparativo de Resistência à Tração (Mistura Referência e Modificada com ASAC e CA convencional com MMT em diversas porcentagens)

Figura 38: Gráfico Resistência à Tração (Amostra não envelhecida e Amostra de referência)

Figura 39: Gráfico Acréscimo de Resistência à Tração com o envelhecimento

Figura 40: Gráfico de Decréscimo de Resistência à Tração com a temperatura

Figura 41: Gráfico Comparativo de Resistência à Tração de Bibliografias Estudadas

Figura 42: Gráfico do Módulo de Resiliência do CA da amostra de referência

Figura 43: Gráfico do Módulo de Resiliência da amostra de referência (10% da RT, 20% da RT, 30% da RT)

Figura 44: Gráfico do Decréscimo do Módulo de Resiliência com a temperatura da amostra de referência

Figura 45: Gráfico do Módulo de Resiliência do CA da amostra grafeno

Figura 46: Gráfico do Módulo de Resiliência do CA da amostra grafeno (10% da RT, 20% da RT, 30% da RT)

Figura 47: Gráfico do Decréscimo do Módulo de Resiliência com a temperatura da amostra de referência e a grafeno

Figura 48: Gráfico do Módulo de Resiliência da amostra de referência (10% da RT, 20% da RT, 30% da RT) e da amostra grafeno nas temperaturas de 25°C e 40°C

Figura 49: Gráfico do Módulo de Resiliência do CA da amostra não envelhecida

Figura 50: Gráfico do Módulo de Resiliência da amostra não envelhecida (10% da RT, 20% da RT, 30% da RT)

Figura 51: Gráfico do Decréscimo do Módulo de Resiliência com a temperatura da amostra não envelhecida

Figura 52: Gráfico do Módulo de Resiliência da amostra de referência (10% da RT, 20% da RT, 30% da RT) e da amostra não envelhecida nas temperaturas de 25°C e 40°C

Figura 53: Gráfico Comparativo do Módulo de Resiliência de Bibliografias Estudadas (30% da RT)

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação do Pavimento

Tabela 2: Classificação das características avaliadas em km do estado do Amazonas

Tabela 3: Composição da Faixa Granulométrica Superpave TMN 12.5 mm

Tabela 4: Número de Girox tráfego (ASTM D 6925)

Tabela 5: Parâmetros para dosagem Superpave

Tabela 6: Especificação dos Protocolos para ensaio de Módulo de Resiliência

Tabela 7: Especificação Brasileira CAP (DNIT 095/2006- EM)

Tabela 8: Caracterização do Ligante Asfáltico

Tabela 9: Viscosidades e Parâmetros (após Envelhecimento) do Ligante Asfáltico

Tabela 10: Caracterização Física dos Agregados

Tabela 11: Distribuição Granulométrica Agregado Graúdo (ASAC) e Agregado Miúdo (Areia Manaus)

Tabela 12: Especificação Material de Enchimento

Tabela 13: Distribuição Granulométrica do ASAC fracionado

Tabela 14: Distribuição Granulométrica do ASAC fracionado nas misturas

Tabela 15: Roteiro para obtenção do teor de projeto

Tabela 16: Parâmetros de compactação para o corpo de prova 1 de cada mistura

Tabela 17: Parâmetros de compactação para o corpo de prova 2 de cada mistura

Tabela 18: Avaliação dos parâmetros obtidos nos teores de ligante iniciais

Tabela 19: Parâmetros de compactação para o corpo de prova 1 da mistura 2

Tabela 20: Parâmetros de compactação para o corpo de prova 2 da mistura 2

Tabela 21: Avaliação dos parâmetros obtidos nos teores de ligante iniciais

Tabela 22: Distribuição Granulométrica Mistura com ASAC

Tabela 23: Acréscimo de Resistência à Tração com a adição de nanomaterial grafeno

Tabela 24: Decréscimo de Resistência à Tração com a Temperatura (Mistura de Referência e Mistura Grafeno)

Tabela 25: Acréscimo de Resistência à Tração com o Envelhecimento

Tabela 26: Decréscimo de Resistência à Tração com a Temperatura

Tabela 27: Influência da temperatura no Módulo de Resiliência da amostra de referência

Tabela 28: Influência da temperatura no Módulo de Resiliência da amostra grafeno  
Influência da temperatura no Módulo de Resiliência

Tabela 29: Influência da temperatura no Módulo de Resiliência

## LISTA DE ABREVIATURAS

AASHTO - *American Association of State Highway and Transportation Officials*

AAUQ - Areia asfalto usinada a quente

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANP- Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

ASAC - Agregado Sinterizado de Argila Calcinada

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

CA - Concreto Asfáltico

CAP - Cimento Asfáltico de Petróleo

CGS - Compactador Giratório Superpave

Cm - Centímetros

CNT- Confederação Nacional dos Transportes

CP - Corpo de Prova

D – Diâmetro do Corpo de Prova

Da – Densidade do CAP da amostra

DNIT- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DRF- Distrito Rodoviário Federal

GEOTEC- Grupode Geotecnia

Gmb – *Maximum Specific Gravity*

Gsa – Densidade Real

Gsb- Densidade Aparente

Gsbssd- Densidade Aparente na condição de superfície saturada

Gse- Densidade Efetiva

h - Média da altura do corpo de prova

LVDT- *Linear Variable Differential Transducer*

Mag- Massa de agregado

MMT-Montmorilonita

MPa- Megapascal (unidade de pressão/tensão)

MR- Módulo de Resiliência

N - Tráfego



N/NE- Norte- Nordeste

Ndes- Número de giros do projeto

Nini- Número de giros inicial

Nmáx- Número de giros máximo

P- Carga Aplicada

PCA – Fração graúda do agregado em relação ao peso total da mistura

Pag- Percentual de agregados na mistura

PC- Pontos de Controle

RBV- Relação Betume/Vazios

RPB- Proporção pó/asfalto

REMAN- Refinaria Isaac Sabbá

RT- Resistência à Tração

s- segundos

SHRP- *Strategic Highway Research Program*

SMA- *Stone Matrix Asphalt*

SUPERPAVE- *Superior Performing Asphalt Pavement System*

TMN – Tamanho Máximo Nominal

UTM 14- Universal Testing Machine 14 Kn

v- Coeficiente de Poisson

VAM- Vazios agregado mineral

VCA- Vazios da fração graúda do agregado na mistura compactada, %

$VCA_{DRC}$  – Vazios da fração graúda do agregado compactado, em %

Vv- Volume de vazios

$\sigma_t$  - Resistência à Tração

% a- Teor de CAP da amostra

$\Delta$ - Deslocamento medido

°C- graus Celsius

ZR- Zona de restrição

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>19</b>
1.1 Objetivos .....	23
1.1.1 Objetivo Geral .....	23
1.1.2 Objetivos Específicos .....	24
1.2. Organização da Dissertação .....	24
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>25</b>
2.1 Nanotecnologia .....	25
2.1.1 Definição de Nanotecnologia .....	25
2.1.2 Evolução Histórica da Nanotecnologia .....	27
2.1.3 Aplicações da Nanotecnologia .....	28
2.1.4. A Nanotecnologia na Construção Civil .....	29
2.1.5. A nanotecnologia aplicada à pavimentação asfáltica .....	32
2.2 Pavimento .....	34
2.2.1 Revestimento Asfáltico .....	35
2.2.2 Concreto Asfáltico .....	35
2.2.3 Agregados Alternativos .....	36
2.2.3.1 ASAC .....	38
2.2.3.2 Grafeno .....	40
2.3. Patologias dos Pavimentos .....	41
2.4. Importância do Processo de Envelhecimento .....	42
2.5. Métodos de Ensaio Laboratoriais .....	43
2.4.1. Resistência à Tração .....	43
2.4.2. Módulo de Resiliência .....	44
2.5. Dosagem Superpave .....	44
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>47</b>
3.1. Materiais .....	48
3.1.1 Ligante Asfáltico .....	48
3.1.2. Agregados .....	49
3.2. Métodos .....	56
3.2.1. Misturas Asfálticas .....	56

3.2.3 Dosagem das Misturas Asfálticas .....	56
3.2.3.1. <i>Dosagem Mineral</i> .....	57
3.2.3.2. <i>Teor de Projeto</i> .....	57
3.2.3.3. <i>Dosagem Superpave</i> .....	59
3.3. Ensaio Mecânico .....	61
3.3.1. <i>Resistência à tração</i> .....	62
3.3.2. <i>Módulo de Resiliência</i> .....	64
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	68
4.1. <i>Caracterização dos Materiais</i> .....	68
4.1.1 <i>Ligante Asfáltico</i> .....	68
4.1.2 <i>Agregados</i> .....	71
4.2. <i>Dosagem da Mistura Asfáltica</i> .....	73
4.3. <i>Caracterização Mecânica</i> .....	79
4.3.1. <i>Resistência à Tração (RT)</i> .....	80
4.3.2. <i>Módulo de Resiliência</i> .....	89
5. CONCLUSÕES .....	98
<b>APÊNDICE</b> .....	<b>101</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>120</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No que concerne ao aspecto histórico, da época da colônia ao império, o Brasil não realizou investimentos significativos em estradas. Nesse período, os investimentos predominavam nos portos e ferrovias, fato esse explicado no comércio ser realizado pela costa do país (BRASIL. Ministério dos transportes, 2016).

A criação do Fundo Rodoviário Nacional (FRN) em 1945 foi o que possibilitou o aumento nos investimentos na infraestrutura rodoviária e, seguido a isso, o governo de Juscelino Kubitschek passou a priorizar o transporte realizado pelas rodovias com o intuito de estimular a produção da indústria automobilística (BEJAMIN,2006).

Atualmente, o modal rodoviário é o mais utilizado no país, representando cerca de 61,8% de todos os modais, seguido pelo modal ferroviário, que representa 19,46%, do aquaviário com 13,8%, do dutoviário com 4,63% e do aeroviário com 0,31%. Para o transporte de passageiros, as rodovias representam ainda 95,5% de participação. Todavia, o estado de conservação do meio de transporte mais utilizado no país é inadequado e traz elevados custos para o setor público e privado (CNT,2016).

De fato, as pesquisas da Confederação Nacional dos Transportes de 2016 confirmam dados alarmantes sobre a situação das rodovias brasileiras. De toda a extensão avaliada, 58,2% apresenta algum tipo de deficiência, ou no pavimento, ou na sinalização ou na geometria da via. Do total, em 34,6% o estado é regular, 17,3% é ruim, 6,3% é péssimo, prejudicando o desempenho operacional. O mais preocupante é a interferência na segurança dos usuários. Para melhor mostrar os resultados da pesquisa da CNT, encontra-se na tabela 1 a classificação dos pavimentos estudados.

Tabela 1: Classificação do Pavimento

Pavimento	Extensão Total	
	Km	%
Ótimo	45.876	44,5
Bom	7.485	7,2
Regular	36.968	35,8
Ruim	10.227	9,9
Péssimo	2.703	2,6
TOTAL	103.259	100,0

Fonte: Pesquisa CNT de Rodovia 2016

A pesquisa da CNT (2016) avalia o estado geral da malha rodoviária pavimentada em todo o país, levando em consideração o pavimento, a sinalização e a geometria da via. No Pavimento, leva-se em conta as condições da superfície da pista principal e do acostamento. Quanto a sinalização se avalia a presença, a visibilidade e a legibilidade de placas ao longo das rodovias e a situação da sinalização horizontal, representada pelas faixas centrais e laterais. No que diz respeito a geometria da via, refere-se ao tipo de rodovia (pista simples ou dupla), a presença de faixa adicional de subida (3ª faixa), de pontes, de viadutos, decurvas perigosas e de acostamento. No Estado do Amazonas, a Pesquisa da Confederação Nacional do Transporte percorreu 980 km, tendo analisado em todo o país 103.259 km.

Ao se analisar o estado do Amazonas, a situação se torna ainda mais dramática. O mesmo estudo realizado em 2016 pela CNT aponta que 96% das rodovias do estado denotam algum tipo de deficiência. Foram qualificadas como regulares, ruins ou péssimas. Somente 4% do total enquadram-se em conceito bom ou ótimo. Por conta dos problemas no pavimento das rodovias amazonenses, o custo de operação do transporte aumenta cerca de 55,4%, devido à redução na segurança, o aumento no custo de manutenção dos veículos e o consumo de combustível. Para estabelecer comparações, a média nacional desse aumento de

operação chega a 24,9% e a da região norte 34,3%. A figura 3 representa a classificação dos estados dos trechos no Amazonas.

Figura 1: Manaquiri/ AM- BR 174



Figura 2: BR 319



Fonte: Pesquisa CNT de Rodovias, 2016.

Figura 3: Classificação dos estados dos trechos no Estado do Amazonas



Fonte: Pesquisa CNT de Rodovias 2016.

Tabela 2: Classificação das características avaliadas em km do estado do Amazonas

Amazonas	Estado	Pavimento	Sinalização	Geometria
Ótimo	-	6	10	
Bom	39	33	227	39
Regular	310	521	222	30
Ruim	256	235	105	457
Péssimo	375	185	416	454
TOTAL	980	980	980	980

Fonte: Pesquisa CNT de Rodovia 2016

No que se refere a Manaus, de acordo com Simas et al (2013), as precárias condições observadas dos pavimentos na capital podem estar associadas sobretudo à escolha do revestimento asfáltico do tipo areia asfáltica (AAUQ), que para as altas temperaturas da região não se enquadra como melhor opção do ponto de vista técnico. No entanto, devido à dificuldade de obtenção de agregado pétreo, que dista

no mínimo aproximadamente 200km, torna inviável a sua exploração e a sua consequente utilização nos pavimentos locais.

Segundo Bertoldo (2010), uma outra alternativa para a escassez de agregados pétreos é a utilização de seixo como agregado graúdo. Entretanto, conforme Frota et al (2016), a extração do seixo para misturas de concreto asfáltico acarreta em problemas ambientais.

Nesse aspecto, há produtos artificiais como Agregado Sinterizado de Argila Calcinada (ASAC) que pode ser empregado como agregado graúdo. De acordo com diversos trabalhos, como Vieira (2000), Nascimento (2005), Frota et al, (2006), Frota et al (2007), Santos et al (2007), Silva (2011), Silva (2014) o ASAC mostra-se promissor e com viabilidade técnica para uso na mistura asfáltica.

Diante do exposto, é de grande relevância para a região amazônica estudos que resultem na busca por materiais alternativos que possam substituir os agregados pétreos convencionais, de modo a apresentar características semelhantes àqueles e que atendam às especificações técnicas mínimas exigidas na pavimentação asfáltica. Desse modo, esses novos materiais podem ser empregados às misturas asfálticas, proporcionando aumento no desempenho mecânico dessas misturas e contribuindo para a preservação da matéria não renovável da região. Adicionado a isso, materiais novos, em escala nanométrica, que têm surgido com propriedades muito importantes, podem ser adicionados às misturas asfálticas, proporcionando diminuição na porcentagem de alguns dos elementos e até mesmo aumento no desempenho mecânico dessas misturas.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Examinar o comportamento mecânico de misturas asfálticas do tipo Concreto Asfáltico (CA), com a participação do material alternativo Agregado Sinterizado de Argila Calcinada (ASAC), na função de agregado graúdo, e de nanomaterial de multicamadas de grafeno, na função de modificador do ligante, mediante o aumento de temperatura e do envelhecimento da mistura.



### 1.1.2 Objetivos Específicos

a) Caracterizar fisicamente os materiais integrantes da Mistura Asfáltica (ASAC, areia, cimento Portland, ligante asfáltico, nanomaterial de multicamadas de grafeno).

b) Realizar dosagem das misturas asfálticas pela metodologia Superpave com o emprego do Compactador Giratório Superpave.

c) Comprovar a viabilidade técnica da mistura asfáltica CA confeccionada com ASAC como agregado graúdo.

d) Determinar o comportamento da mistura asfáltica de Concreto Asfáltico de Referência (ASAC, areia, cimento Portland e cimento asfáltico de petróleo) quanto à Resistência à Tração (RT) e quanto ao Módulo de Resiliência (MR).

e) Determinar o comportamento da mistura asfáltica de Concreto Asfáltico Grafeno (ASAC, areia, cimento Portland, cimento asfáltico de petróleo e nanomaterial de multicamadas de grafeno) quanto à Resistência à Tração (RT) e quanto ao Módulo de Resiliência (MR).

f) Determinar o comportamento da mistura asfáltica de Concreto Asfáltico não Envelhecida (ASAC, areia, cimento Portland, cimento asfáltico de petróleo) quanto à Resistência à Tração (RT) e quanto ao Módulo de Resiliência (MR).

g) Comparar o desempenho mecânico da mistura asfáltica de Concreto Asfáltico grafeno com a composição de referência.

h) Comparar o desempenho mecânico da mistura asfáltica de Concreto Asfáltico não envelhecida com a de referência.

i) Contribuir com alternativas técnicas à pavimentação regional.

## 1.2. Organização da Dissertação

A pesquisa em questão está dividida em capítulos, articulada do seguinte modo:

No capítulo 1 estão descritos a parte introdutória do trabalho e os objetivos almejados com o estudo.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, mencionando-se a nanotecnologia, o seu histórico, as aplicações no âmbito geral e mais restritamente no campo da construção civil e da pavimentação asfáltica, com foco para o

nanomaterial de multicamadas de grafeno. Neste capítulo também serão descritas informações sobre pavimentação asfáltica, mais precisamente sobre a mistura asfáltica empregada do tipo CA (Concreto Asfáltico). Discorre-se também sobre os materiais alternativos que podem ser empregados na pavimentação asfáltica com destaque para o Agregado Sinterizado de Argila Calcinada que será utilizado no trabalho, a importância do envelhecimento na execução das misturas asfálticas, os métodos de ensaios laboratoriais que serão realizados no trabalho (ensaio de Resistência à Tração e o de Módulo de Resiliência), além da metodologia Superpave, que foi adotada na dosagem para a mistura asfáltica estudada.

No capítulo 3 são descritos os materiais e métodos de caracterização dos componentes da mistura asfáltica (ligante+agregados+filer+nanomaterial), o processo de dosagem e os ensaios mecânicos realizados para o estudo do comportamento mecânico.

No capítulo 4 apresenta-se e se discute os resultados obtidos com os ensaios mecânicos, onde são interpretados detalhadamente os dados obtidos com os corpos de prova testados.

Finalmente, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas e sugestões para trabalhos futuros.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Nanotecnologia**

#### **2.1.1 Definição de Nanotecnologia**

A nanotecnologia é o novo campo da ciência que lida com estruturas em nanoescala. Para se ter uma idéia das dimensões dos objetos nessa escala, faz-se a seguinte analogia: se um fio de cabelo humano tivesse como diâmetro um campo de futebol, uma partícula nanométrica teria o diâmetro de uma caneta. As nanopartículas têm tido diversas aplicações, devido às suas diversas propriedades (ANIRKHANIAN et al, 2011).

Figura 4: Representação em escala de nanopartículas

# Escala nanométrica

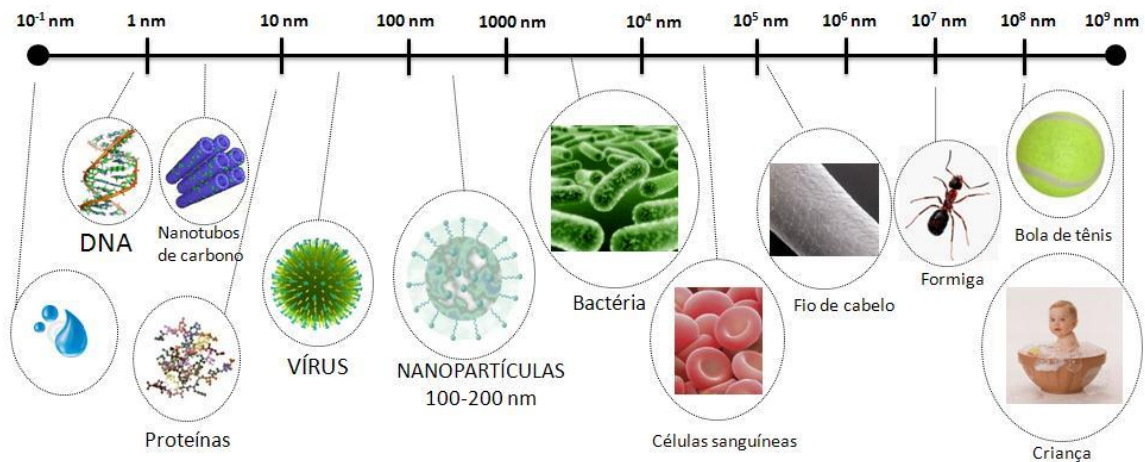


Figura: Cândice Felippi

Fonte: <http://betaeq.com.br/index.php/2015/09/29/a-origem-da-nanotecnologia-e-suas-varias-aplicacoes>

Essa inovação corrobora para o entendimento e controle da matéria na escala nanométrica. Desse modo, a denominada nanoescala trata de dimensões entre 1 e 100 nanômetros ( $1 \text{ nanômetro} = 10^{-9}$  metros), ilustrada na Figura 4.

As principais razões da mudança no comportamento dessas partículas referem-se à área superficial aumentada e a predominância dos efeitos quânticos. Um aumento na área superficial (por unidade de massa) resulta em aumento na reatividade química. Quanto aos efeitos quânticos, esses podem surgir e alterar significativamente as propriedades ópticas, magnéticas ou elétricas de um material (ROYAL SOCIETY, 2004).

A ciência da nanotecnologia mostra-se como a habilidade de controlar a matéria em escala nanométrica e utilizar as suas propriedades e fenômenos. Pode ser definida também como a capacidade de controlar a matéria nessa escala nano e utilizar as propriedades e fenômenos desta dimensão em materiais, ferramentas e sistemas modernos. A nanotecnologia, com seu caráter interdisciplinar, abrangerá todas as tecnologias no futuro e, ao invés de competir com as mesmas, conduzirá à sua integração (MOTLAGH, 2012).

Desse modo, em consonância com o exposto pela Royal Society (2004), a tecnologia em nanoescala é vislumbrada como um renascimento tecnológico e bom

fluxo de capital. Novos produtos inspirados nessa inovação trarão mudanças representativas no bem-estar, na qualidade de vida, no meio ambiente e na própria capacidade de defesa, além de redirecionamentos econômicos.

### **2.1.2 Evolução Histórica da Nanotecnologia**

Ramsden (2016) descreve que em 1959 houve uma conferência realizada por Richard Feynman com o título "*There's Plenty of Room at the Bottom*" (Há muito espaço lá em baixo). Nesse evento, Feynman descreveu as possibilidades importantes que poderiam surgir caso os cientistas pudessem controlar átomos e moléculas e, dessa forma, os microscópios eletrônicos. No entanto, em nenhum momento foi usado o termo nanotecnologia. Todavia, pode-se considerar que para os dias atuais, essa palestra significou uma visão da tecnologia em nanoescala (TOUMEY, 2009).

Mesmo passados vinte anos dessa palestra, no ano de 1983, Feynman falou do mesmo tema, porém com título diferente "*Infinesimal machinery*" (Máquinas infinitesimais). Nessa palestra reafirmou as idéias da primeira palestra, tendo certas partes reiteradas textualmente. No entanto, apenas após três anos desse último encontro com os cientistas, Feynman veio a falecer acometido de um câncer. O seu legado não ficou perdido, pois foi alvo de publicações em livros e revistas e é considerado o idealizador pioneiro na área de nanotecnologia (FEYNMAN, 2006).

Todavia, somente nos últimos anos que se desenvolveram ferramentas sofisticadas que pudessem manipular e investigar a matéria em nanoescala. Um fato marcante foi a invenção do microscópio de tunelamento de varredura (STM) e de força atômica (AFM) no ano de 1986, que proporcionou a obtenção de imagens em escala nanométrica dos mais diversos materiais (ROYAL SOCIETY, 2004).

De fato, a nanotecnologia é hoje a tradução de uma revolução tecnológica que é de grande alcance e de efeito na história. Na área de engenharia de materiais, cada dia são desenvolvidos novos materiais com propriedades superiores aos já existentes (YAMAMURA, 2009).

### **2.1.3 Aplicações da Nanotecnologia**

Nos últimos anos, muitos estudos têm sido concentrados na área de nanotecnologia devido às suas aplicações avançadas nos diversos campos. Pode-se considerar que houve impulso em pesquisas nesse sentido ao longo desses anos. É fato que as nanopartículas têm muitas aplicações em variadas áreas, devido às suas características únicas que as diferem da matéria convencional. Dentre as aplicações cita-se: Química, catálise e design de drogas; Medicina, optoeletrônica; Dispositivos, células solares, sensores, baterias, eletrodos de condução (AHMARUZZAMAN, 2016).

Conforme Peng et al (2004), os nanofios semicondutores, por exemplo, têm atraído grande atenção devido ao seu tamanho submicron, que por isso possuem propriedades elétricas e ópticas originais e aplicações potenciais no campo da nanoeletrônica, tais como: transistores de efeito de campo de alta velocidade, sensores biológicos e químicos e emissores de luz com baixo consumo de energia. No caso dos nanofios de silício, estes carregam importância ainda maior, pois o silício trata-se do material básico da microeletrônica.

Na nanobiotecnologia há a combinação de múltiplos setores através do estudo e desenvolvimento, como: nanotecnologia, biotecnologia, ciência dos materiais, física e química que podem proporcionar novos recursos para a avaliação e desenvolvimento de novas tecnologias que sejam mais seguras e eficazes que as convencionais (DIANPANKAR et al 2012).

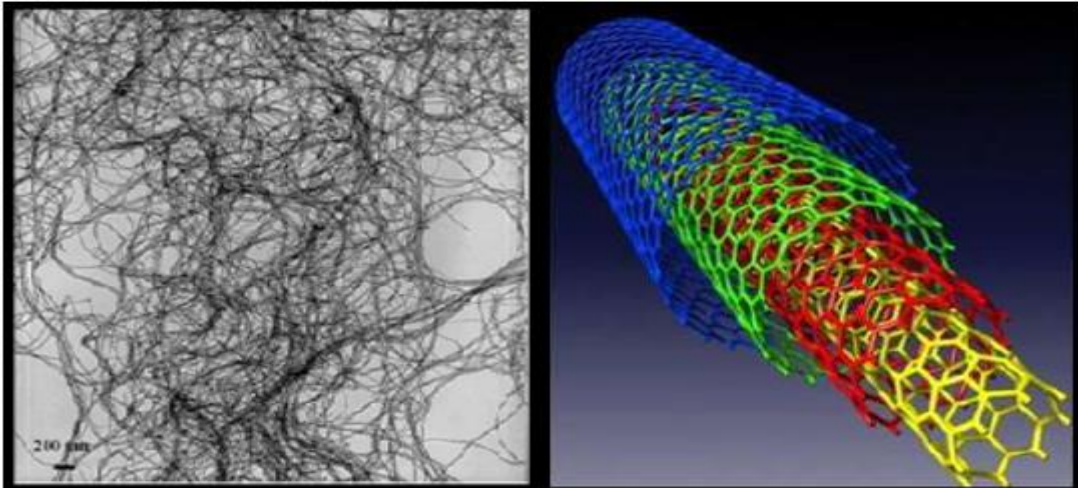
No campo da medicina, de acordo com Cai E Chen (2007) a nanotecnologia possui excelentes resultados para detecção precoce, diagnóstico preciso e tratamento personalizado do câncer. Ainda se tratando da área da saúde, nanopartículas de ouro são vitais na morte de células cancerosas.

A nanotecnologia vem sendo amplamente empregada também em outras indústrias, como a do petróleo, que ganhou enorme interesse nos últimos anos, sendo as nanopartículas de sílica as mais amplamente testadas (MOKHATAB,2006).

Dentre as diversas aplicações da tecnologia em nanoescala, uma de uso predominante na fabricação de compósitos de alto desempenho, diz respeito aos nanotubos de carbono, ilustrados na figura 5, que nas últimas décadas têm sido

usados como reforços, devido a qualidade das características mecânicas atreladas a esse material (MONTES e MORAN et al, 2002).

Figura 5: Nanotubos de Carbono



Fonte: Motlagh, 2012

Ao lado dos nanotubos de carbono, há o grafeno, que consiste em uma única camada atômica de átomos de carbono interconectados. O interesse nesse material tem sido crescente por apresentar, entre outras características eletrônicas, características mecânicas notáveis. Para se ter idéia, consegue-se atingir o limite resistência mais elevado conhecido até então. Dentre as suas utilizações pode-se citar os sensores, dispositivos de armazenamento de energia e fotodetectores (KAZI, 2015).

É visto, pois, que a nanotecnologia tem alcançado espaço nas mais diversas áreas de conhecimento. Os nanomateriais deverão desempenhar papel fundamental nas próximas décadas, dentro do amplo espectro de setores, incluindo a indústria química, da construção civil, petrolífera, eletrônica e saúde, dentre outras.

#### **2.1.4. A Nanotecnologia na Construção Civil**

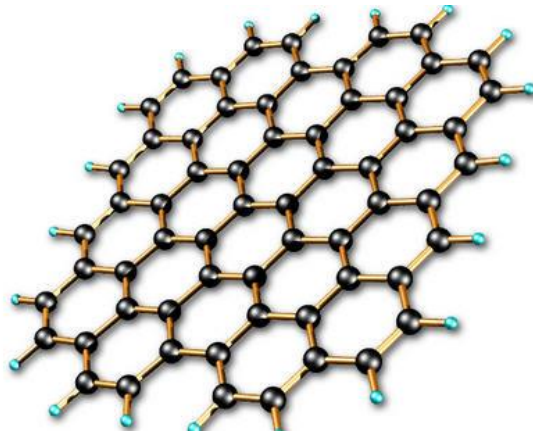
A aplicação da nanotecnologia no campo da construção ainda é muito insignificante. Com a evolução da tecnologia nanométrica em indústrias biomédicas e eletrônicas, a indústria da construção passou a buscar recentemente uma forma de melhorar os materiais de construção convencionais e, para isso, fazendo uso de uma variedade de nanomateriais. Vários nanomateriais podem melhorar as características dos materiais convencionais de construção, tais como resistência, durabilidade e propriedades térmicas. Todavia, a utilização dessa tecnologia em nanoescala tem o alto custo dos produtos nanoestruturados. Apesar do custo, o seu uso em materiais de construção deve se tornar corrente devido à transmissão de propriedades altamente valiosas a proporções de aditivos relativamente baixos em materiais nanoestruturados (SCRIVENER E KIRKPATRICK, 2008).

Estudos recentes em construção civil têm sido conduzidos para desenvolver nanomodificadores utilizando óxidos cerâmicos nanométricos em materiais cimentícios, visando melhorar as propriedades físico-químicas dos concretos e argamassas. Dentre os materiais mais estudados, a nanosilica se destaca por suas propriedades pozolânicas (SANCHEZ e SOBOLEV, 2010).

Os nanotubos de carbono também são exemplos de materiais que reforçam os compósitos de cimento. Esse tipo de nanomaterial possui ampla aplicação na eletrônica, biotecnologia, química. A força e a rigidez desse modificador acabam por melhorar o desempenho mecânico do concreto e suprimir a geração e o crescimento de rachaduras, além de ser facilmente dispersos (MAKAR e BEAUDOIN, 2004).

O grafeno, cuja estrutura cristalina está representada na Figura 6, é um material com grande potencial para o futuro da engenharia civil devido a sua baixa densidade e excelente resistência mecânica. Para parametrizar a comparação, antes da invenção do grafeno, considerava-se que o aço era o material de construção mais resistente. No entanto, sabe-se que esse novo material é da ordem de cem vezes mais resistente que o aço (KHITAB e ARSHAD, 2014).

Figura 6: Ilustração do grafeno



Fonte: <http://tecnologia.culturamix.com/tecnologias/o-que-e-grafeno>

Vários estudos vêm sendo realizados para constatar o desempenho na aplicação do grafeno em argamassa de cimento. Notou-se que a adição de nanopaleas de grafeno tem de fato aprimorado a condutividade elétrica desse tipo de argamassa, que torna o cimento um detector de danos, no qual o aumento na condutividade elétrica, pode relacionar-se ao nível do dano do material (DU e PANG, 2015).

Outro tipo de aditivo ao concreto para melhorar as suas propriedades são as nanopartículas do Dióxido de Titânio, que é um pigmento branco que pode ser usado como um revestimento de reflexão favorável, além de ser capaz de quebrar poluentes orgânicos, compostos orgânicos voláteis através de fortes reações fotocatalíticas e, portanto, a fim de criar propriedades de desinfecção para tintas cimento e vidro é adicionado, ou seja, ao se utilizar o Dióxido de Titânio na área externa da estrutura, pode-se reduzir a concentração de poluentes no ar (MELO e TRICHES, 2012).

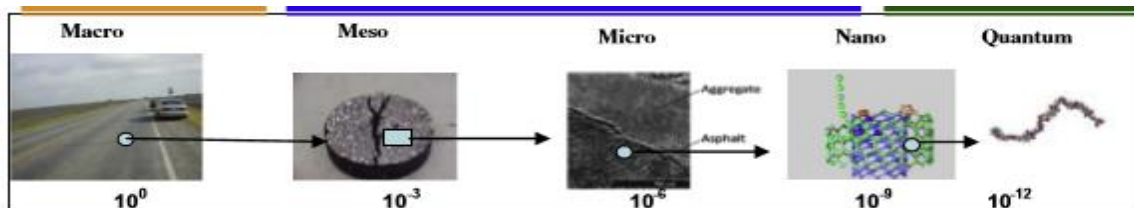
Desse modo, a indústria da construção civil tem sido considerada como a área com muitos potenciais de desenvolvimento no viés da nanotecnologia. Ainda está nos primeiros estágios de expansão. Aos poucos as pesquisas na área tem avançado, sendo necessário fazer grandes esforços em ciência e tecnologia (SALAMANCA e BUENTELLO, 2005).



### 2.1.5. A nanotecnologia aplicada à pavimentação asfáltica

O asfalto possui composição química complexa, com propriedades viscosas e elásticas que variam fortemente com o tempo e com a temperatura. Pesquisadores vêm aplicando vários tipos de modificadores para melhorar o desempenho dos materiais asfálticos. Até agora os principais tipos de modificadores são polímeros (SBS, borracha e resina), agentes anti-trincas (cinzas de cal, saponina alcalina e agente de acoplamento) fibras (como fibras de aço, de madeira, de basalto, de poliestireno, de vidro e de carbono) e filler (cinza de carvão, enxofre, diatomita e sílica). (GUO et al, 2016). A figura 7 representa a ilustração das diferentes dimensões de asfalto.

Figura 7: Ilustração da evolução de dimensões diferentes de asfalto



Fonte: You, 2009

Ainda de acordo com GUO et al, 2016, nos anos recentes, a nanotecnologia tem sido amplamente usada em muitos campos como nova tecnologia com amplas perspectivas. Muitos pesquisadores têm usado nanomateriais no cimento. Dessa forma, a modificação do asfalto por adição de nanomaterial é relativamente atrasada, comparada com o concreto modificado.

Um dos aditivos promissores no campo da construção é o uso de nanotubos de carbono que foi primeiramente caracterizado de forma profunda em 1991 por Iijima. (IJIJIMA, 1991). De modo geral, os nanotubos de carbono são feitos de camadas de grafite que se enrolam para formar uma estrutura tubular, o que é realizado através de vários métodos. Na maioria deles usa-se a eletricidade ou gás inerte em câmara fechada. (LAMB et al, 1993). Conforme Motlagh et al, 2012, as propriedades especiais e únicas dos nanotubos de carbono, como o alto módulo de

Young, boa resistência à tração, alta condutividade térmica e alta densidade superficial, o levam a ser usado como aditivo e modificador do asfalto.

As nanoargilas são largamente empregadas na modificação do polímero na realização de melhorias significativas em propriedades mecânicas, térmicas e de barreira (You, 2010). O tipo de argilomineral em camadas mais manuseado é a montmorilonita (MMT), no qual a estrutura consiste em camadas com dois tetraedros de sílica, intercalados por uma camada de octaédrica de alumina.

Muitos estudos têm se dedicado ao emprego das nanoargilas como reforço dos ligantes asfálticos. Mesmo havendo alguns tipos desse material que não interferem na rigidez ou viscosidade do ligante, outros tipos mostram-se muito bons. (LEE et al, 2008). De acordo com Yang e Tighe, 2013, na realização dos testes de rigidez, resistência à tração, módulo de tensão, resistência a flexão e módulo de estabilidade térmica, notou-se que o módulo de elasticidade do ligante modificado por nanoargila foi maior que o não modificado e que a dissipação da energia mecânica foi menor, demonstrando que há vantagem na sua adição.

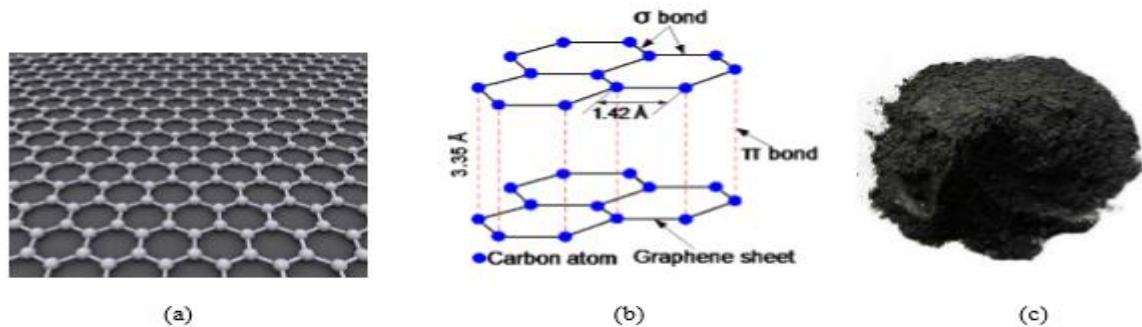
Há também pesquisas que empregam a nanosílica como modificador do ligante, que é um composto abundante, que possui também serventia fora da área de ciência de materiais, como em medicações, por exemplo. Uma outra função desse material seria o reforço de elástomeros, no sentido de melhorar a sua reologia ( YANG e TIGHE, 2013).

Conforme estudos de You et al., 2011 e Yao et al. 2012, a adição de 2% a 4% de nanosílica do peso do ligante, pode reduzir a profundidade da deformação permanente para quase a metade. De acordo com essas pesquisas, notou-se também que as profundidades das deformações permanentes diminuíram se comparadas com as misturas não modificadas. As menores deformações foram detectadas ao se empregar as maiores porcentagens de nanosílica. Todavia, os estudos realizados nas misturas asfálticas modificadas com nanomateriais ainda são inexpressivos se comparados aos realizados na área de modificação dos ligantes por partículas nanométricas.

Um novo material que é foco de pesquisas, enquadrado na área da Engenharia Civil, é a fibra de basalto, que possui boas propriedades físicas e estáticas. A adição de fibras de basalto em concreto asfáltico trouxe resultados positivos para a estabilidade da mistura asfáltica e apesar do custo envolvido, a utilização desse material mostra-se vantajosa (MOROVA, 2013).

De acordo com estudos, a adição de grafeno, para modificação do ligante, melhoram as propriedades mecânicas e de compactação, comprovando que melhora o desempenho dos pavimentos asfálticos ( LE at al, 2016).

Figura 8: Representação de Nanoplaqueta de grafeno (GNP): (a) folha de grafeno, (b) estrutura atômica do GNP, (c) como materiais GNP são recebidos.



Fonte: Le et al, 2016

Por conseguinte, conforme Sun et al. (2016), essas pesquisas comprovam que os nanomateriais conseguem aumentar o desempenho da pavimentação asfáltica, comprovando que de fato é vantajoso a sua em compósitos asfálticos.

## 2.2 Pavimento

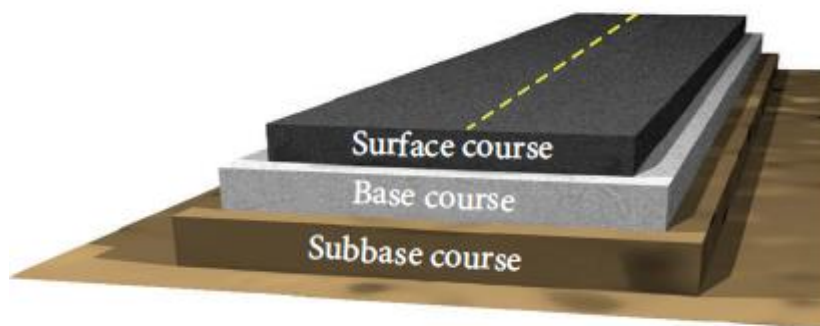
Conforme Brown (1996), os pavimentos são estruturas de engenharia civil usadas pelos veículos que devem proporcionar segurança e conforto para os seus usuários. É importante salientar que há uma grande variedade de estruturas de pavimento que dependem da natureza dos veículos, das cargas das rodas envolvidas e do número dessas cargas durante certo período de tempo.

A configuração de uma estrada pavimentada baseia-se em uma ou mais camadas de material, em que cada uma possui a função de distribuir a carga. A camada inferior deve ser mais larga e a camada superior, por estar exposta a maiores solicitações, necessita ser de material mais resistente (COOK, 2013). A

ilustração das camadas do pavimento pode ser observada conforme descrição na figura 9.

Conforme Hamed (2010), os pavimentos asfálticos rodoviários podem ser definidos como camadas de asfalto construídas ligadas sobre uma base granular. Devido a isso, a estrutura total pavimento sofre deflexão por conta das cargas do tráfego, o que dá a esse tipo de elemento a denominação de pavimento flexível. É, pois, uma estrutura composta de várias camadas de materiais, que dividida em camada de revestimento asfáltico, base e subbase, como mostrado na figura 9.

Figura 9: Estrutura típica da estrutura do pavimento flexível



Fonte: Mashaan, 2014

### **2.2.1 Revestimento Asfáltico**

De acordo com o Instituto do Asfalto (2002), o revestimento asfáltico está exposto ao tráfego de veículos, devendo ser resistente à distorção, com superfície de rolamento lisa e, ao mesmo tempo, resistente à derrapagem. Além disso, deve ser dotado de impermeabilidade e sua declividade deve ser tal que a água possa ser transportada para as laterais, proporcionando proteção para o pavimento. A superfície do pavimento deve ter também resistência ao desgaste proporcionado pelo tráfego dos veículos, mantendo as propriedades anti-derrapantes e mantendo-se aderida a camada da base.

### **2.2.2 Concreto Asfáltico**

Um dos tipos mais comuns do mundo de materiais empregados na camada superficial do pavimento é o concreto asfáltico. É um material poroso produzido a temperaturas muito elevadas, composto por uma mistura de ligante asfáltico, partículas agregadas e vazios de ar. Após algum tempo a rigidez desse tipo de mistura aumenta, enquanto que sua capacidade de relaxamento diminui, tornando a pasta mais frágil e ocasionando o surgimento de micro-rachaduras (BRANTHAVER,1993).

O concreto de asfalto (CA) consiste em compósito típico de matriz polimérica composto por ligante asfáltico, agregados minerais e vazios de ar. Desse modo, possui comportamento complexo viscoelastoplástico, o qual dependente do tempo e comportamento não-linear que depende da tensão a que está sendo submetida (CHOI E KIM, 2013).

Esse tipo de mistura asfáltica tem ampla utilização em pavimentos de pontes, de aeroportos cada uma com aplicações estruturais relacionadas. No entanto, é desejado o uso concomitante desses materiais para funções estruturais com o intuito de fornecer estruturas inteligentes e dirimir os altos custos, a baixa durabilidade e a complexidade de projeto (LIU,2008).

Conforme Shaw (1980), o tipo de mistura asfáltica concreto asfáltico (CA) deve possuir alta rigidez para ter capacidade de resistir à deformação permanente. No então, as misturas desse tipo devem possuir resistência à tração suficiente no interior da camada de asfalto para evitar o surgimento de fissuras após a solicitação de muitas cargas.

### **2.2.3 Agregados Alternativos**

O setor da construção é um dos mais importantes e de maior responsabilidade no desenvolvimento social e econômico de qualquer sociedade. No entanto, essa indústria é uma das mais poluidoras que, além de causar impactos ambientais significativos, faz uso de grandes quantidades de recursos naturais tais como energia, água, solo, produzindo grande quantidades de resíduos que, na maioria das vezes, não são controlados ou reciclados (COELHO e DE BRITO, 2011).

Conforme Estanqueiro et al., 2016, a aplicação de componentes reciclados em materiais de construção é um dos aspectos que deve ser analisado para diminuição de impactos ambientais. Os resíduos provenientes construção e demolição são geralmente gerados durante a construção civil, demolição, atividades de renovação de edifícios, trabalhos rodoviários (WU et al., 2015). Em suma, os pontos positivos inerentes da gestão de resíduos são bem claros, todavia a aplicação dessas práticas em países em desenvolvimento já não é tão simples (LOCKEY et al., 2016).

O uso de resíduos de construção e subprodutos industriais como vidro, escórias, asfalto reciclado do pavimento para a construção de estradas, têm sido recentemente enfatizados devido ao potencial de esgotamento de fontes de agregados de alta qualidade. Há também a necessidade de utilizar materiais alternativos, devido às flutuações nos preços dos materiais de construção rodoviária, como o ligante asfáltico. Além de aumentar a conscientização sobre as questões ambientais, como eliminações de emissões de gases prejudiciais à camada de ozônio (GEORGE,2016).

A utilização de materiais reciclados é de grande prioridade na indústria da pavimentação, não apenas pela redução dos custos de construção, mas pela minimização do impacto ambiental da construção rodoviária. Nas últimas décadas foram investigadas o emprego de diferentes materiais recicláveis como o asfalto fresado, também denominado de RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) nos Estados Unidos, além de escória de alto forno, cinzas, resíduos de borracha de pneus, resíduos de vidro e telhas. Há destaque, porém para o pavimento de asfalto recuperado (RAP) e as telhas de asfalto reciclado (MOON,2014).

Conforme o NCHRP (2001), o pavimento de asfalto recuperado foi usado nos EUA por mais de três décadas. Quase 73 milhões de toneladas de RAP são recuperadas e 84% são usados anualmente em pavimentação asfáltica no país americano, configurando-se como o material mais reciclado nos EUA. Conforme Hansen et al., 2011) na última década, outra fonte significativa de reciclagem materiais para construção de pavimentos são as telhas de asfalto reciclado (RAS). As telhas de asfalto são amplamente utilizadasna construção de telhados nos EUA, quase 11 milhões de toneladas de resíduos de cobertura betuminosasão gerados a cada ano nos EUA e a maioria deles são descartados em aterros sanitários.

O Grupo de Geotecnia da UFAM vem buscando alternativas, com o uso da matéria prima disponível na região ou resíduos da indústria da construção civil. De acordo com estudos realizados no estado do Amazonas, pelo mesmo grupo de pesquisa, a substituição do material pétreo convencional, como o seixo, pelos resíduos da construção e demolição, confere bons resultados para as misturas asfálticas (FROTA et al., 2003).

Os trabalhos do grupo não se restringiram ao uso de resíduos de construção e demolição. Os estudos foram alavancados com a sua inserção na Rede de Asfalto Norte/Nordeste em 2002, no projeto “Caracterização Mecânica de Misturas Asfálticas e Agregados Regionais, e Asfaltos Produzidos pelas Refinarias N/NE”. Com objetivo de desenvolver alternativas para a melhoria dos pavimentos da Região Amazônica, o Grupo de Geotecnia fez parcerias importantes (Petrobras/UN-AM, Ministério dos Transportes), e ao mesmo tempo obteve financiamento de órgãos de fomento – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM), por meio de concorrência por editais públicos, o que possibilitou a solidificação dos conhecimentos. Dentre os materiais estudados, além dos resíduos da construção e demolição, têm-se os agregados sinterizados de argila calcinada (SILVA, 2011).

### **2.2.3.1 ASAC**

Pesquisas em agregados leves têm sido realizadas desde 1966, com a instalação de uma fábrica de argila expandida em Jundiaí. Já os primeiros estudos sobre argila calcinada na Região Amazônica foram realizados pelo Departamento de Infraestrutura Rodoviária (DNER, 1981). Posteriormente, Fabrício (1986) levou ao desenvolvimento de uma planta de protótipo móvel para produzir argila expandida.

Cabral et al. (2008) realizaram estudos sobre o emprego do ASAC em misturas de asfalto com matérias-primas do Estado do Pará, que obtiveram excelentes resultados quando comparados ao natural Agregado, mostrando que o agregado sintético pode suportar compactação mecânica pesada, conforme testes de degradação.

Cabral et al. (2013) relataram o uso de ASAC em concreto estrutural no estado do Amazonas, verificando-se que a resistência mecânica era semelhante à da agregados naturais, como o seixo, para o mesmo consumo de cimento.

Silva et al.(2014) realizaram o estudo viscoelástico da mistura asfáltica confeccionada com agregados sinterizados de argila calcinada, embasada no ensaio de módulo dinâmico e complementando pesquisas do Grupo de Geotecnia da Universidade Federal do Amazonas, GEOTEC.

Há também estudo nessa mesma área de efeito realizados pelo Instituto Militar de Engenharia(IME) e pelo Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), os quais consideram como promissores o uso desse agregado artificial (SILVA, 2013).

Silva (2011) obteve o módulo dinâmico uniaxial (tração com tensão controlada e tração/compressão com deformação controlada) de uma mistura com o agregado alternativo e de outras com agregado convencional (seixo rolado).O estudo salienta que os módulos dinâmicos das misturas com ASAC apresentaram-se superiores aos das misturas com seixo para altas temperaturas de ensaio e baixas frequências de aplicação de carga, mostrando que as mesmas, nessas condições que melhor retratam a situação dos pavimentos locais, estão menos susceptíveis às deformações permanentes, como é o caso dos afundamentos de trilhas de roda. Para baixas temperaturas e altas frequências, o processo se inverteu e as misturas com seixo passaram a apresentar maiores valores de  $|E^*|$  que as misturas com ASAC. Ou seja, as misturas com o material alternativo mostraram-se menos susceptíveis às variações de temperatura que as misturas com seixo rolado.

Silva et al (2015) pesquisaram o desempenho mecânico de misturas asfálticas com ASAC (agregado graúdo), considerando-se suas características viscoelásticas. Comparou-se o comportamento do ligante quando submetido ao aumento da temperatura compatível com as condições locais, determinando-se o módulo complexo com os ensaios de rigidez (vigotas) por flexão a quatro pontos, avaliando-se também a viabilidade de confecção das vigotas em um molde metálico.

Barbosa (2016) analisou o comportamento mecânico de misturas asfálticas do tipo Stone Matrix Asphalt (SMA), com a participação de materiais alternativos como o Agregado Sinterizado de Argila Calcinada (ASAC) e o Resíduo da



Construção e Demolição, ambos na função de agregado graúdo e obteve bons resultados de resistência à tração, módulo de resiliência e módulo dinâmico.

Aragão et al (2017) estudaram o módulo resiliente para proporções estáticas de resistência à tração indireta permitindo inferir que as misturas de asfalto feitas com agregados sintéticos apontam para uma vida de fadiga mais longa quando comparada a misturas com seixo.

### **2.2.3.2 Grafeno**

O grafeno despontou como material que permite uma variedade de aplicações devido às propriedades mecânicas e eletrônicas excelentes que possui, das quais vão da área da microeletrônica até a medicina (PALERMO, 2013).

Conforme Novoselov et al. (2012) o material grafeno consiste em uma camada muito fina de carbono, na qual possui diversas propriedades, com grande potencial para emprego em uma variedade de áreas como materiais leves, revestimentos especializados, novos biomateriais e sensores, além de aplicações médicas inovadoras.

Uma folha desse material configura-se como uma única camada de átomos de carbono, de arranjo hexagonal, possuindo propriedades mecânicas e de transporte de elétrons superiores aos materiais conhecidos. Para se ter noção, a rigidez do grafeno é na faixa de 1 TPa, a sua condutividade elétrica é maior que a do cobre e a resistência do grafeno tem valor cerca de 100 vezes a do aço. ( LEE et al., 2008). Deve-se destacar que o grafeno também possui uma estabilidade térmica alta, de no mínimo 2600 K (KIM et al., 2010)

A sua obtenção tem sido muito estudada, culminando em diversos métodos de produção desse material, dentre os mais comuns pode-se citar a esfoliação mecânica do grafite, a fabricação química e os diferentes crescimentos epitaxiais, redução química do óxido de grafite por redutor como a hidrazina, esfoliação da fase líquida do grafite em solventes orgânicos e também procedimentos de intercalação do grafite seguido de aquecimento térmico ( CHEN et al., 2010)

Kun et al. (2016), utilizaram moinho de atrito de alta eficiência, configurando-se como uma ferramenta de sucesso para a produção de multicamadas de grafeno que para a melhor resposta obteve-se 40 multicamadas de

grafeno. Empregou-se na moagem etanol que, se comparada com adição de água ou apenas a interferência do ar, apresenta o melhor resultado na separação das camadas de grafite e dentre os tempos de moagem estudados. Na moagem de 10h obteve-se a maior distância entre as multicamadas aderentes separadas, o que comprovou o maior grau de esfoliação.

Com o passar dos anos de pesquisa com intuito principal de produzir grafeno de alta qualidade, mesmo em pequena escala, o foco dos estudos agora tem sido a aplicação desse material no mundo real. Desse modo, há vários profissionais dispostos a desenvolver formas de obter grafeno menos defeituosos o possível, em grandes quantidades e a um baixo custo (LEON et al., 2013)

### **2.3. Patologias dos Pavimentos**

As misturas asfálticas são frequentemente empregadas na Engenharia de Pavimentos. Durante a vida útil, esses compósitos estão sujeitos a cargas e tensões que podem levá-los a sua deterioração. A fadiga é uma das dificuldades mais comuns nas misturas asfálticas e é causada principalmente pelo carregamento do tráfego e pelo gradiente térmico (BAEK, 2010.)

Ao eixo do veículo passar pela superfície do pavimento, a carga de tráfego aplicada induz uma ação de flexão, bem como duas tensões de cisalhamento. As variações de temperatura periódicas resultam em contração e expansão repetidas, que levam à tensão de tração no pavimento. A passagem repetida dos veículos, ao longo do tempo, com o efeito de alavanca gerado por tensões devido à variação da temperatura, desencadeiam um processo de fadiga que eventualmente levam ao surgimento e propagação de deformações ao longo das camadas do pavimento (MORENO, 2012).

A fase de laboratório é importante para selecionar os materiais adequados para a mistura asfáltica. No intuito de se evitar as deformações devido a fadiga, um dos principais fatores a serem considerados são o ligante asfáltico e o filer, o filer proporciona coesão a mistura e devida resistência à tração e ao cisalhamento para resistir a ação térmica e da carga do tráfego (BARDESI, 2010).

As deformações que surgem em misturas betuminosas, como em outros compósitos como o concreto, geralmente se inicia na argamassa e se propagam ao

longo da mistura. Por conta disso, a seleção correta de betume, enchimento e agregado fino é crucial para um ótimo desempenho de mistura. Mas, outro fator importante na prevenção das fissuras é a escolha do Agregado Graúdo, pois a sua forma e graduação fornece atrito interno e de rolamento capaz de resistir às tensões devido às cargas do tráfego, além disso afeta a adesão com o ligante asfáltico e sua resistência à fragmentação (Mo et al., 2009).

As deformações devido a fadiga é uma das patologias mais comuns em pavimentação em todo o mundo e um dos principais fatores que conduzem o fim da vida útil de uma rodovia. A fadiga surge por conta de dois mecanismos de deterioração que dizem respeito ao carregamento do tráfego e a ação de gradientes térmicos. As consequências a longo prazo dessa patologia pode acarretar problemas do ponto de vista estrutural com transferências de cargas que podem ocasionar deformações e falhas de cisalhamento, além de penetração de umidade e de outros agentes químicos, os quais podem reduzir significativamente a segurança e conforto do usuário (MORENO, 2013).

#### **2.4. Importância do Processo de Envelhecimento**

De acordo com Idham et al. (2015) o ligante asfáltico sofre processos de envelhecimento em duas fases: a curto e a longo prazo. Esses processos envolvem fenômenos muito complexos que ocorrem devido a muitos fatores. O envelhecimento a curto prazo, consiste na exposição do ligante asfáltico a altas temperaturas e alto grau de exposição ao ar durante a produção de asfalto quente, antes que seja exposto ao meio ambiente. A fase de envelhecimento a longo prazo ocorre com o pavimento em serviço a uma temperatura relativamente mais baixa por um longo período. Durante a fase de produção, a perda de elementos voláteis do ligante asfáltico e a oxidação progressiva do pavimento em serviço são os principais motivos pelos quais a mistura asfáltica torna-se rígida. Com esse processo há também aumento na viscosidade do ligante, que contribui para o enrijecimento das misturas (BROWN, 2000).

No processo de usinagem, os agregados tem a sua superfície coberta por uma fina película de ligante asfáltico. Essa película é formada por reações químicas

desse ligante com o oxigênio do ar. A espessura dessa película vai interferir na flexibilidade e durabilidade das misturas, quanto mais espessa maior serão esses valores, enquanto que películas menos espessas formarão misturas frágeis e quebradiças que tendem a trincar (KANDHAL & CHAKRABORTY, 1996).

De acordo com Tonial (2001), há fatores importantes no envelhecimento de longo prazo, como teor de vazios, espessura da película, absorção do agregado e a espessura do revestimento asfáltico. O teor de ligante e o de vazios da mistura e a sua mudança no teor de vazios da misturas devido a densificação do tráfego são também fatores que influenciam no envelhecimento e o processo de oxidação depende da espessura do revestimento asfáltico.

O processo de envelhecimento pode trazer benefícios para a mistura asfáltica, pois a enrijece e pode melhorar as propriedades de distribuição de carga e resistência à deformação permanente. No entanto, ao mesmo tempo, também pode resultar em fragilização que aumenta a tendência do pavimento se quebrar e perder a sua durabilidade em termos de resistência ao desgaste (BROWN, 2000).

## **2.5. Métodos de Ensaio Laboratoriais**

### **2.4.1. Resistência à Tração**

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral, o *brazilian test*, foi criado pelo professor Fernando Luiz Lobo Carneiro, da UFRJ, em 1943, atualmente usado no mundo inteiro (Carneiro, 1947). Inicialmente desenvolvido para o concreto, os corpos de prova de forma cilíndrica são expostos a cargas estas que devem ser aplicadas em direções diametralmente opostas, segundo um plano radial (BALBO, 2007).

De acordo com a American Society for Testing of Materials (ASTM), o resultado do ensaio brasileiro de resistência à tração representa normalmente um valor superior ao da resistência à tração direta do material. (ASTM,2008) Luong (1990), porém, mostrou que alguns estudos apresentaram valores de resistências obtidas indiretamente superiores em mais de 50% àquelas obtidas diretamente (Hawkes & Mellor, 1970; Wright, 1955).

Nos pavimentos, surgem pressões verticais oriundas de esforços externos

aplicados pelas rodas dos veículos. Desse modo, os pavimentos são submetidos a flexão, cisalhamento, compressão vertical e horizontal. No que diz respeito a compressão vertical, ocorre com esse tipo de esforço o afastamento das partículas, ocasionando tração e compressão nas zonas de contato entre agregados e ligantes. Com a repetição das deformações de tração, surgem deformações plásticas ou microfissuras nestas zonas, podendo levar os materiais a um estado de fadiga ou ruptura. A ruptura pode ser medida por meio do ensaio de compressão diametral, com a força ou pressão que causa a ruptura formando um arranjo que permite impor um plano de ruptura idêntico ao plano de aplicação de carga (BALBO, 2007).

#### **2.4.2. Módulo de Resiliência**

Segundo Francis Hveem (1955), a resiliência pode ser definida classicamente como “energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações”. É importante destacar que o termo módulo de resiliência foi criado para que não haja confusão com o módulo de Young, cuja determinação é realizada estaticamente (Hveem, 1955).

Na determinação do módulo de resiliência há métodos nacionais e internacionais mais relevantes, os quais têm diferenças baseadas na temperatura do ensaio, frequência, duração do pulso de carga, modo de contato dos leitores das deformações, número dos ciclos de carregamento, carga utilizada e coeficiente de Poisson (BRITO & GRAEFF, 2008).

#### **2.5. Dosagem Superpave**

O Programa Estratégico de Pesquisa Rodoviária (SHRP) foi iniciado em 1988 com objetivo de desenvolver uma metodologia de mistura melhorada. Os procedimentos de implementação da metodologia Superpave deu-se em 1997 nos Estados Unidos, obtendo grande aceitação pelos departamentos estaduais de transporte (WILLIAM, 2004).

A fim de melhorar o desempenho, durabilidade, segurança e Eficiência das misturas de asfalto, a Strategic Highway Research Programa (SHRP), criada em 1987, propôs o sistema Superpave em 1993. Superpave incluiu um conjunto de avanços significativos nas metodologias utilizadas para classificar pastas de asfalto e para projetar misturas de asfalto. Além disso, o sistema Superpave definiu as chamadas propriedades de consenso e fonte de partículas de agregados (ARAGÃO et al., 2016).

Pode-se destacar como maior distinção entre esse novo método e a dosagem Marshall, o modo como ocorre a compactação do corpo de prova. Na dosagem Marshall, a compactação é realizada por impacto, por meio de golpes, enquanto que na dosagem Superpave, a mesma é feita por amassamento, através pressão sob movimento rotatório (YILDIRIM et al, 2000).

Em pesquisas sobre equipamentos de compactação de laboratório, houve avaliação de vários tipos desses dispositivos. Com isso, foram reconhecidos os benefícios dos compactadores giratórios, que passaram a ser adotados na Superpave (RUSHING, 2011). O Compactador Giratório Superpave (SGC) é um dispositivo que tem função de produzir corpos de prova para ensaios, de modo a simular o efeito do tráfego da forma mais fiel em um pavimento asfáltico, produzindo materiais que acomodem os agregados graúdos e permitindo a monitoração da densificação durante a compactação (BAYOMY,2004).

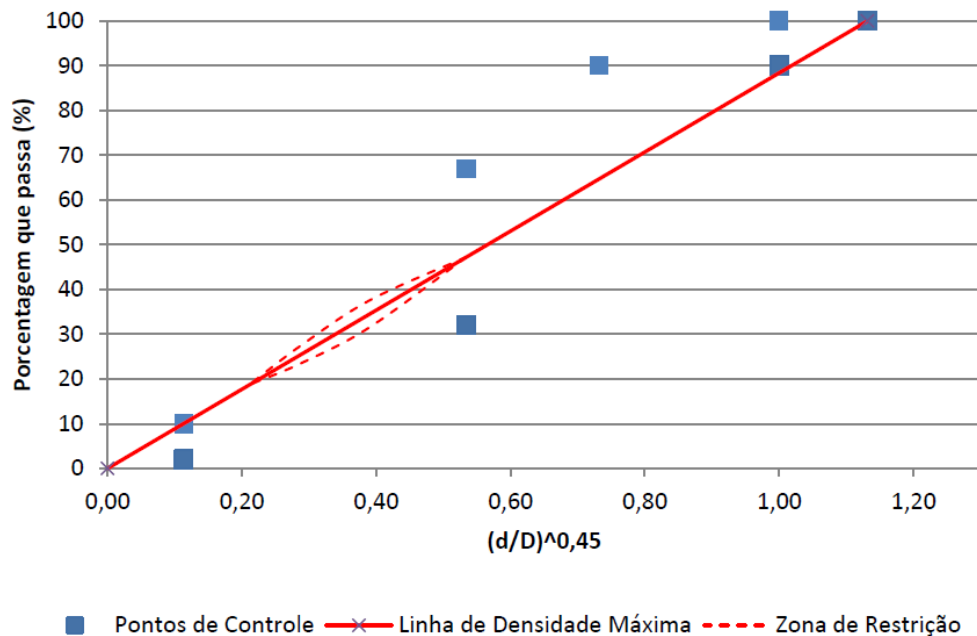
Yildirim et al. (2000) destacam que na metodologia Superpave, as misturas asfálticas são projetadas para um nível específico de compactação, denominado n projeto. Esse valor depende do clima em que a mistura será executada e do nível de tráfego.

Conforme o Instituto do Asfalto (2002), testes de desempenho e modelos de previsão de desempenho foram de grande relevância metodológica em pesquisas da SHRP. É relevante salientar que os dados provenientes destes testes são usados nas previsões do desempenho real do pavimento. Procedimentos de testes e modelos de previsão de desempenho foram desenvolvidos para permitir a estimativa do desempenho da vida útil da mistura, de forma a resistir a falhas como deformação permanente, trincamento por fadiga e trincamento à baixa temperatura.

Portanto, ao se comparar as dosagens, Marshall e a Superpave, detecta-se algumas diferenças quanto a granulometria, a compactação e o envelhecimento da mistura. A granulometria da mistura mineral deve passar entre pontos de controle

(PC), e não deve ultrapassar a zona de restrição (ZR), que pode ser representada por meio de um gráfico, com o eixo das ordenadas a porcentagem passante em peso relativa a uma determinada peneira (escala aritmética) e no eixo das abcissas a abertura das peneiras elevadas à potência de 0,45mm. A compactação, que é por amassamento realizada pelo CGS (Compactador Giratório Superpave), acaba por simular da forma mais adequada as condições de campo. No caso do envelhecimento, este simula a usinagem.

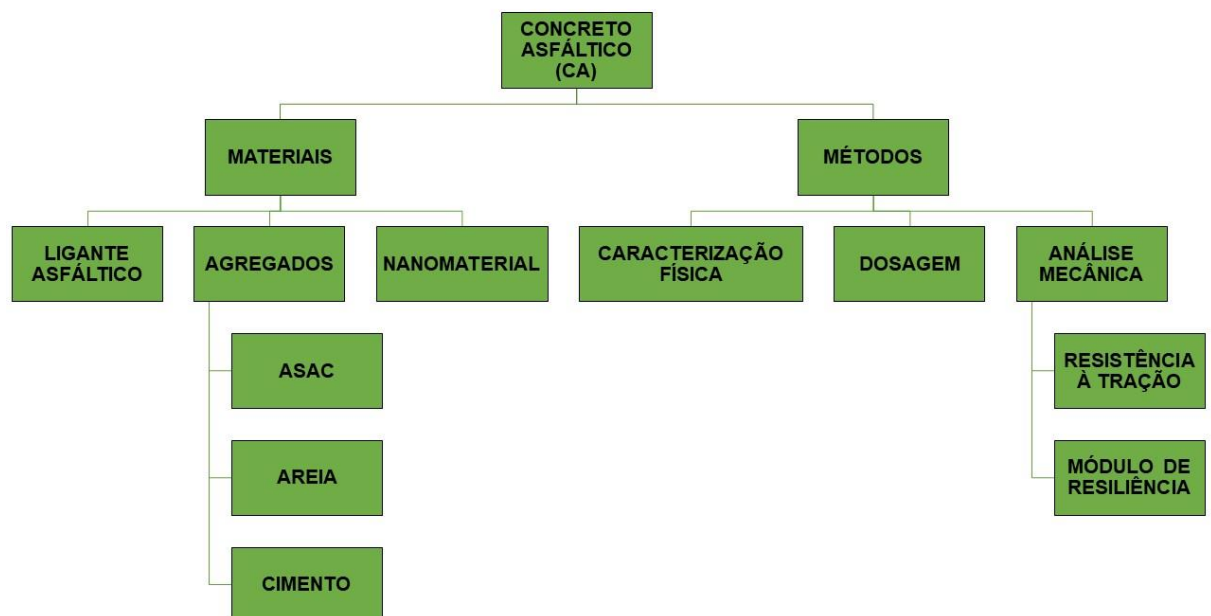
Figura 10: Pontos de Controle para seleção granulométrica Superpave TMN 12,5mm



### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

A mistura asfáltica do tipo Concreto Asfáltico é constituída usualmente de ligante asfáltico, agregados graúdo e miúdo e fíler. Neste trabalho, empregou-se os seguintes materiais: cimento asfáltico de petróleo (CAP), agregado graúdo alternativo Agregado Sinterizado de Argila Calcinada (ASAC), areia residual como material miúdo e cimento *Portland* como fíler. A figura 11 mostra o fluxograma da metodologia utilizada para a pesquisa da mistura asfáltica empregada na pesquisa.

Figura 11: Fluxograma da Metodologia





### 3.1. Materiais

#### 3.1.1 Ligante Asfáltico

O ligante betuminoso utilizado é classificado como Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP 50/70), comercializado na região pela Refinaria Isaac Sabbá (REMAN), oriundo dos petróleos do Campo Fazenda Alegre, no Estado do Espírito Santo, e do Ceará-mar, no Estado do Ceará.

A Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), é encarregada pela regulamentação dos produtos. Desse modo, a caracterização do ligante é fornecida pelo fabricante conforme ensaios prescritos pela resolução da mesma agência regulamentadora. Esses testes podem ser definidos como: Penetração, Ponto de Amolecimento, Viscosidade, Índice de Suscetibilidade, Ponto de Fulgor, Solubilidade de Tricloroetileno, Ductilidade e Penetração.

O ensaio de Penetração (ASTM, 1997), realizado a 25°C, é o parâmetro empregado para a seleção de classes do Cimento Asfáltico de Petróleo, significando uma maior consistência do cimento asfáltico relacionada a uma menor penetração. Já os outros ensaios descritos na norma, estabelecem condições mínimos para utilização do ligante.

Figura 12: CAP 50/70 em aquecimento



Fonte: Autor

### 3.1.2. Agregados

As misturas asfálticas foram compostas por: i) agregados graúdos (o ASAC, como material tradicional), confeccionado a partir de processos industriais; ii) agregado miúdo, areia residual, também fornecido pela na usina de asfalto da Empresa ETAM, lograda na Av. Margarita 2, Nova Cidade, no Município de Manaus; iii) material de enchimento, o cimento *Portland* CP II-Z-32, usualmente utilizado na construção civil regional; iv) aditivo ao ligante, nanomaterial de multicamadas de grafeno, proveniente da moagem do grafite, doado pela empresa Nacional Grafite LTDA, localizada na Av. Paulista, 460, 11ª Andar. Bela Vista. São Paulo.

#### 3.1.2.1. Agregado Graúdo

O solo utilizado na produção do Agregado Sinterizado de Argila Calcinada é proveniente da província petrolífera de Urucu (Amostra SUC), localizada no município de Coari, estado do Amazonas, a cerca de 650km de Manaus (FROTA et al, 2004b). Já nos primeiros trabalhos realizados pelo Grupo de Geotecnia (GEOTEC) da Universidade Federal do Amazonas foram obtidos bons desempenhos mecânicos, quando a produção ainda se dava manualmente (SILVA, 2011).

Figura 13- Amostra SUC



Os primeiros trabalhos desenvolvidos com o ASAC eram realizados manualmente e consistia nas etapas de i) homogeneização da amostra com água; ii) moldagem de massas de solo no formato cilíndrico para corte em telas; iii) secagem dos agregados à sombra; iv) Acondicionamento dos agregados em jarros cerâmicos; v) calcinação em forno elétrico, a aproximadamente 900°C. No entanto, essa produção manual dos agregados de argila calcinada apresentava alguns problemas. A granulometria era contínua dificultando o enquadramento nas faixas granulométricas do DNIT ou Metodologia Superpave, além de ser um processo lento com obtenção de pequenas quantidades de material, demandando muito tempo no processo produtivo (FROTA et al. 2004b e SILVA, 2011).

Devido aos problemas mencionadas, optou-se por industrializar o processo de produção do ASAC, que foi realizado em indústria de cerâmica equipada para fabricação de produtos cerâmicos como tijolos e telhas. A produção do agregado seguiu as seguintes etapas: i) inserção de amostra em silo com auxílio de pá carregadeira; ii) trituração; iii) homogeneização com adição de água; iv) moldagem de tijolos maciços; v) secagem em túnel; vi) calcinação em fornos abóboda com temperatura máximo de 900°C; vii) britagem dos tijolos para obtenção dos ASAC.

Figura 14- Inserção de amostra em silo com auxílio de pá carregadeira (Esquerda) / Amostra sendo introduzida no triturador (Direita)



Fonte: SILVA, 2011

Figura 15- Secagem dos tijolos em sistema de túnel (direita) / ASAC obtido após britagem (esquerda)



Fonte: SILVA, 2011

Os agregados graúdos de ASAC inicialmente foram estudados por meio do ensaio de peneiramento, com base na norma americana ASTM C136, 2006, que auxilia na delimitação da granulometria da mistura asfáltica do tipo CA.

Os agregados também foram avaliados quanto aos seguintes parâmetros:  $G_{sa}$  (*Apparent Specific Gravity*),  $G_{sb}$  (*Bulk Specific Gravity*),  $G_{sb_{ssd}}$  (*Bulk Specific Gravity in the condition Saturated Surface Dry*), absorção (ASTM C127, 2012), massas específicas ( $W_{ur}$  – *Rodded Unit Weight* e  $W_{ul}$  – *Loose Unit Weight*) de acordo com AASHTO T19 (2009).

É importante salientar que a absorção é a representação do aumento da massa do agregado devido aos poros permeáveis à água. Desse modo, é um parâmetro de extrema relevância para representar o consumo do ligante pelo agregado. Em vista disso, a absorção e densidade são calculadas pelas relações entre as massas secas (A), superfície saturada seca (B) e submersa (C), mostradas abaixo:

$$Absorção = \frac{B - A}{A} 100(\%) \quad (1)$$

$$G_{sa} = \frac{A}{A - C} \quad (2)$$

$$G_{sb} = \frac{A}{B - C} \quad (3)$$

$$G_{sb_{ssd}} = \frac{B}{B - C} \quad (4)$$

Destaca-se que a granulometria do material cerâmico teve como referência a textura recomendado pela *National Asphalt Pavement Association* (NAPA, 2002).

Esses materiais graúdos também foram caracterizados quanto às suas Massas Específicas Solta e Compactada, segundo a norma AASHTO T19 (2009), e calculadas pela equação abaixo:

$$\gamma_{agregado} = \frac{G - T}{V} \quad (5)$$

$\gamma_{agregado}$  – massa específica agregado graúdo;

G – massa do agregado mais o recipiente;

T – massa do recipiente;

V – volume do recipiente.

Examinou-se também a adesividade (DNER-ME 078/94) dos agregados pétreos a qual mostrou satisfatoriedade quanto ao potencial do material pétreo aderir à película de ligante, que vai depender das propriedades da superfície do agregado e da composição química do ligante.

Figura 16- Agregado ASAC antes do

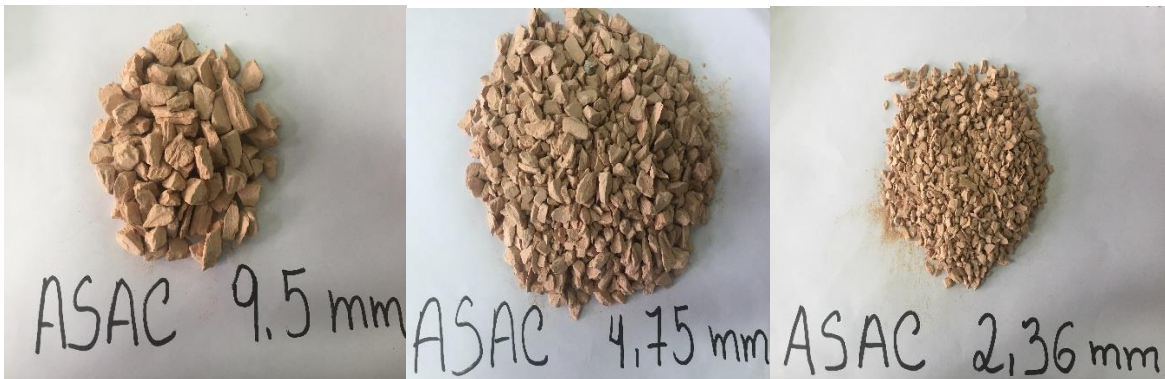


fracionamento

Fonte: Autor



Figura 17- ASAC SUC (Após o Fracionamento)



Fonte: Autor

#### b) Agregados Miúdos

O agregado miúdo também se submeteu ao ensaio de granulometria, preconizado pela ASTM C136, 2006, com a determinação dos parâmetros:  $G_{sa}$  (Densidade real),  $G_{sb}$  (Densidade aparente) e absorção (ASTM C128, 2012), e pela massa específica compactada (*Rodded Unit Weight*) seguindo a AASHTO T19/T19 M-93, 1997.

Figura 18: Areia Manaus



Fonte: Autor

c)Filer

No caso do material filer, examinou-se pela massa específica real, preconizado pela norma DNER ME 085, 1994 e pela granulometria baseada na norma DNER EM 367, 1997.

### **3.1.3. Nanomaterial de Multicamadas de Grafeno**

O nanomaterial proveniente do grafite também participou da mistura asfáltica, na condição de modificador do ligante asfáltico. Antes de ser misturado ao asfalto, o grafite passou pelo processo de moagem, por 4 horas, até chegar a condição de nanomaterial, o qual misturou-se ao ligante asfáltico aquecido e só então foi adicionado a mistura asfáltica. O método de produção de material de multicamadas de grafeno está ilustrado nas Figuras 19-21.

A moagem do material realizou-se pelo equipamento SPEX SamplePrep 8000-series Mixer/Mills, do tipo de alta energia, com frasco do tipo vasilha com uma ou mais bolas, de motor com 1/3 Hp de potência e frequência de 1425 RPM (Figura 19).

Figura 19: Moinho de alta energia



Fonte: Autor

Figura 20: Grafite antes da moagem



Fonte: Autor

Figura 21: Grafite após 4h de moagem





Fonte: Autor

O resultado da moagem (Figura 20-21) foi então caracterizado por meio do ensaio de difração de raios x, para a comprovação da característica nanométrica do modificador do ligante.

## **3.2. Métodos**

### **3.2.1. Misturas Asfálticas**

A mistura asfáltica do tipo CA, no que concerne aos agregados, teve suas faixas granulométricas máximas e mínimas, baseadas nas informações da tabela 4, Norma AASHTO MP 8-02, devendo ser adotado como tamanho máximo nominal de 12,5 mm.

### **3.2.3 Dosagem das Misturas Asfálticas**

A dosagem das misturas asfálticas se deu através do produto da mistura de agregados de vários tamanhos e o cimento asfáltico de petróleo. Nesta pesquisa, realizou-se os ensaios com o Concreto Asfáltico, que é o tipo de revestimento asfáltico mais empregado no país. Inicialmente, os agregados menores preenchem os vazios provenientes dos agregados maiores, o que proporciona uma mistura

densa, adicionando a esta, o filer mineral. A dosagem mineral é o nome dado à mistura adequada composta pelos agregados graúdos, miúdos e filer. No intuito de completar o compósito asfáltico é que se adiciona o ligante, no qual o seu valor apropriado é denominado de teor de projeto ou teor ótimo.

### 3.2.3.1. Dosagem Mineral

A Metodologia seguida ao longo do trabalho foi Superpave, essa metodologia foi desenvolvida com base em dados obtidos amplamente a partir de rodovias com volume de médio a alto. (KIM et al., 2009). É resultante do programa SHRP, no qual estabelece uma faixa granulométrica, que deve limitar-se na área dos pontos de controle, que são função do Tamanho Máximo do agregado (SHRP, 1994a, 1994b).

Para TMN 12,5mm, os pontos de controle estão mostrados na tabela 3. Conforme Marques (2004), a distribuição granulométrica passa entre os PCs (Pontos de controle) e evitar a ZR (Zona de Restrição).

Tabela 3: Composição da Faixa Granulométrica Superpave TMN 12.5mm

Peneira (mm)	% passando, em peso			
	Pontos de Controle		Zona de Restrição	
	Inferior	Superior	Inferior	Superior
<b>25,0</b>	-	-	-	-
<b>19,0</b>	100	-	-	-
<b>12,5</b>	90	100	-	-
<b>9,50</b>	-	90	-	-
<b>4,75</b>	-	-	-	-
<b>2,36</b>	28	58	39,1	39,1
<b>1,18</b>	-	-	25,6	31,6
<b>0,60</b>	-	-	19,1	23,1
<b>0,30</b>	-	-	15,5	15,5
<b>0,15</b>	-	-	-	-
<b>0,075</b>	2	10	-	-

Fonte: (Norma AASHTO MP 8-02).

### 3.2.3.2. Teor de Projeto

As propriedades mecânicas das misturas asfálticas dependem em grande parte do tipo e da quantidade de asfalto usado (Krishnan, 2003). Segundo Harvey e Tai (2003) com o aumento do teor de asfalto numa mistura asfáltica pode-se obter maior vida de fadiga, visto que esse tipo de problema pode surgir em revestimentos asfálticos com baixos teores de ligante asfáltico. Em contrapartida, valores em excesso de ligante podem ocasionar em maiores deformações, com a ocorrência de exsudação do ligante. Desse modo, a determinação do teor de asfalto é de extrema importância na execução de um revestimento asfáltico, que deve manter o equilíbrio entre diversos fatores, sendo também designada de teor ótimo.

No estudo em questão, na determinação do teor de projeto, empregou-se a metodologia Superpave. Conforme Yldirim et al. (2000), a maior distinção entre esse novo método e a dosagem Marshall, é o modo como ocorre a compactação do corpo de prova. Na dosagem Marshall, a compactação realizada por impacto, por meio de golpes, enquanto que na dosagem Superpave, a mesma é feita por amassamento, através pressão sob movimento rotatório com auxílio do Compactador Giratório Superpave-CGS.

Figura 22: Preparo Corpo de Prova de Concreto Asfáltico com ASAC



Fonte: Autor

### 3.2.3.3. Dosagem Superpave

A dosagem SUPERPAVE foi executada, em consonância com as etapas previstas em norma. De início escolheu-se três composições granulométricas, reproduzindo para cada uma delas dois corpos de prova;

Os parâmetros de compactação referentes ao número de giro (inicial, de projeto e máximo), são definidos em função do tráfego, descrito na Tabela 4:

Tabela 4: Número de giros x tráfego (ASTM D 6925).

Tráfego N AASHTO x 10 <sup>6</sup>	Parâmetros de compactação		
	N <sub>ini</sub>	N <sub>des</sub>	N <sub>máx</sub>
< 0,3	6	50	75
0,3 a 3	7	75	115
3 a 30	8	100	160
> 30	9	125	205

Preparou-se a amostra com as porcentagens adequadas de cada material integrante, após o aquecimento do ligante na viscosidade apropriada para a composição (ASTM D 6925).

No tocante a execução da mistura modificada, previamente o nanomaterial proveniente do grafite, das multicamadas de grafeno foi adicionado ao ligante aquecido, misturado de tal forma que se evitasse a formação de grumos de grafite, para a melhor distribuição possível na mistura asfáltica. Posteriormente, o processo de mistura de todos os constituintes, foi realizado manualmente, com aquecimento do tacho, procurou-se homogeneizar do melhor modo a mistura e todos os seus constituintes, inclusive o nanomaterial de multicamadas de grafeno empregado como modificador do ligante e desse modo, minimizando dessa forma, a aglomeração na mistura.

Realizou-se o condicionamento térmico por duas horas em estufa na temperatura de compactação, que se refere ao envelhecimento da mistura asfáltica, correspondendo a simulação do que ocorre na realidade, da produção da massa

asfáltica até aplicação na pista, para a mistura modificada com multicamadas de grafeno e a mistura de referência.

Para a mistura de referência separou-se todo o material com as porcentagens adequadas e ligante previamente aquecido, misturou-se todos os constituintes e após o ligante envolver todos os agregados e estar na temperatura adequada, também se realizou o condicionamento térmico por duas horas em estufa, referindo-se ao envelhecimento da mistura.

No que concerne à mistura não envelhecida, seguiu-se os mesmos passos da de referência com exceção do condicionamento térmico por duas horas, a sua compactação foi realizada de imediato.

Para os três tipos de misturas, a não envelhecida de imediato e a de referência e a modificada após o envelhecimento, colocou-se a mistura no molde metálico, que também estava na temperatura de compactação, sendo o mesmo levado ao Compactador Giratório Superpave, mostrado na figura 23, o qual foi compactado.

Realizou-se a compactação por amassamento, para cada número de giro desejado (inicial, projeto e máximo), e anotou-se a altura correspondente do corpo de prova.

Após a compactação, retirou-se o corpo de prova do molde e determinou-se a densidade aparente (*Bulk Specific Gravit* –  $G_{mb}$ ), seguindo a norma ASTM D 1188 ou ASTM D 2726 (material absorvivo)

Determinou-se também a densidade máxima da mistura (*Maximum Specific Gravity* –  $G_{mm}$ ) de acordo com a norma ASTM D 2041 e em seguida definiu-se os parâmetros volumétricos da mistura, conforme os valores de  $G_{mb}$  e  $G_{mm}$ , sendo o principal deles relacionado ao volume de vazios ( $V_v$ ) igual a 4%, referente à compactação com o número de giros do projeto ( $N_{des}$ ).

Ainda se calculou: Vazios do Agregado Mineral (VAM), Relação Betume Vazios (RBV), percentual de compactação ao número de giros inicial ( $N_{inicial}$ ) e máximo ( $N_{máximo}$ ) e proporção pó/asfalto efetiva (RPB), descritos na tabela 5.

Finalmente, o teor de projeto da mistura deveria atender a todos os requisitos concomitantemente. Como não ocorreu, teve-se que alterar a estimativa inicial da porcentagem de ligante ou da dosagem mineral e realizou-se uma nova tentativa.

Tabela 5: Parâmetros para dosagem Superpave.

Tráfego $N \times 10^6$	Densidade relativa requerida			Vazios do agregado mineral (VAM) [% mínima]						Relação betume/vazios (RBV) [%]		Relação pó/betume efetivo [%]	
	% Gmm			Tamanho Máximo Nominal (TMN) [mm]									
	$N_{ini}$	$N_{des}$	$N_{máx}$	37,5	25	19	12,5	9,5	4,75				
< 0,3	91,5	96,0	98,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	70	80,0	0,6	1,2
0,3 a 3	90,5	96,0	98,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	65,0	78,0	0,6	1,2
3 a 10	89,0	96,0	98,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	65,0	75,0	0,6	1,2
10 a 30	89,0	96,0	98,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	65,0	75,0	0,6	1,2
> 30	89,0	96,0	98,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	65,0	75,0	0,6	1,2

Fonte: NAPA (2002)

Figura 23: Compactador Giratório



Superpave

Fonte: Autor

### 3.3. Ensaio Mecânico

O comportamento mecânico das misturas asfálticas depende dos materiais que as constituem, assim como da proporção de cada um deles. Há mudança no

seu comportamento ao longo do tempo, decorrente do envelhecimento do ligante asfáltico do revestimento, decorrente também da mudança de estrutura interna. Na avaliação da mistura asfáltica empregada no trabalho, os testes mecânicos que foram realizados dizem respeito à Resistência a Tração e o Módulo de Resiliência.

### 3.3.1. Resistência à tração

O valor da resistência à tração da presente pesquisa foi determinado conforme preceitos normativos (DNIT 136/2010-ME). As temperaturas utilizadas foram 25 °C, 40°C e 60 °C. Deve ficar claro que a temperatura de 25°C representa a norma brasileira, enquanto que 40°C e 60°C simularam as condições dos revestimentos asfálticos em Manaus (PICANÇO et al, 2011).

Os corpos de prova, 3 para cada temperatura, elaborados de acordo com os teores de projeto, foram submetidos a uma carga estática (P), no sentido diametral, com velocidade de 0,8 mm/s, até que atingissem a ruptura. Cabe destacar que a realização do ensaio foi acompanhada pelo software *UTS002 3.12 Stress Strain Test*, que faz o cálculo da RT pela equação abaixo:

$$\sigma_t = \frac{2P}{100\pi Dh} \quad (6)$$

$\sigma_t$  – Resistência à tração, em MPa

P – Carga de ruptura, em N

D – Diâmetro do corpo de prova, em cm

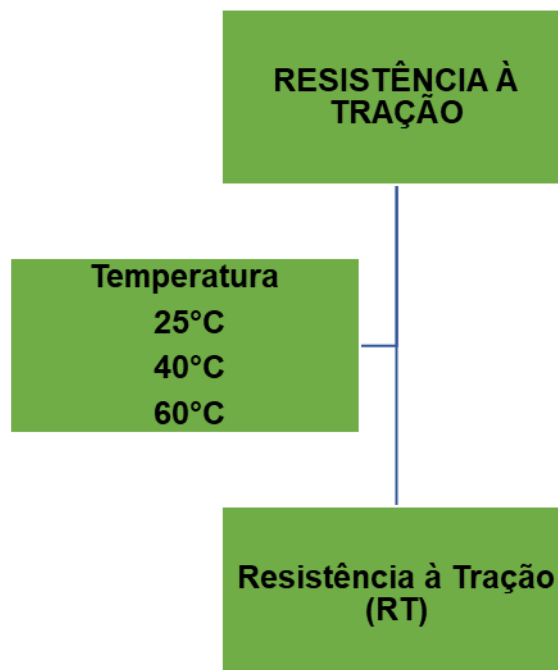
h – Altura do corpo de prova, em cm.

Figura 24: Ensaio de Resistência à tração na UTM 14



Fonte: VALENÇA, 2012

Figura 25: Fluxograma adotado para o ensaio de Resistência à Tração



Dentre os procedimentos para o ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral (DNIT 136/2010-ME), pode-se mencionar inicialmente i)



confeccionou-se os corpos de prova de acordo com a dosagem estudada; ii) determinou-se as medidas de altura e diâmetros dos corpos de prova; iii) centralizou-se os corpos de prova na base apoio, com colocação do friso metálico, para levar o conjunto até a prensa; iv) Desceu-se o pistão até que pudesse entrar em contato com o friso metálico, v) Inseriu-se os dados da amostra no software; vi) Acionou-se o equipamento. Com a realização do procedimento, a carga foi aplicada progressivamente até que o corpo de prova atingisse a sua ruptura, tudo acompanhado pelo software. Os dados referentes à ruptura foram anotados e procedeu-se com o cálculo, conforme fórmula descrita na equação 1.

Para os ensaios realizados em outras temperaturas, diferentes da temperatura ambiente de 25°C, fechou-se o equipamento UTM14, acionando-se o controle de temperatura da câmara ambiental na temperatura do ensaio (40°C e 60°C) até que houvesse o equilíbrio térmico dos corpos de prova. Para os ensaios na temperatura de 60°C, os corpos de prova de compósitos asfálticos foram deixados em estufa até atingirem a temperatura do ensaio, executando-se o teste com a câmara de temperatura também acionada. É importante salientar que ao longo do ensaio as medidas das temperaturas foram aferidas para garantir as temperaturas desejadas para o experimento.

### **3.3.2. Módulo de Resiliência**

Nesta pesquisa, o módulo de resiliência foi calculado com o software *UTS003 1.41 Indirect Tensile Modulus Test* conforme as normas ASTM D4123 (1995) e AASHTO TP-31-96 (2000). Com esse programa foi possível calcular o MR com a equação 2, baseada no modelo de Hondros (BRITO & GRAEFF, 2008), o qual se considera a carga como distribuída (friso), ao invés de uma carga pontual. Também segundo Brito & Graeff (2008) na aferição do módulo de resiliência são descritos métodos nacionais e internacionais que se diferenciam por alguns aspectos do ensaio, como temperatura do ensaio, frequência, duração do pulso de carga, modo de contato dos leitores das deformações, número dos ciclos de carregamento, carga utilizada e coeficiente de Poisson, respectivamente apresentados na Tabela 6.

$$MR = \frac{P}{\Delta h} (\nu + 0,2699) \quad (7)$$

MR – Módulo de resiliência, em MPa

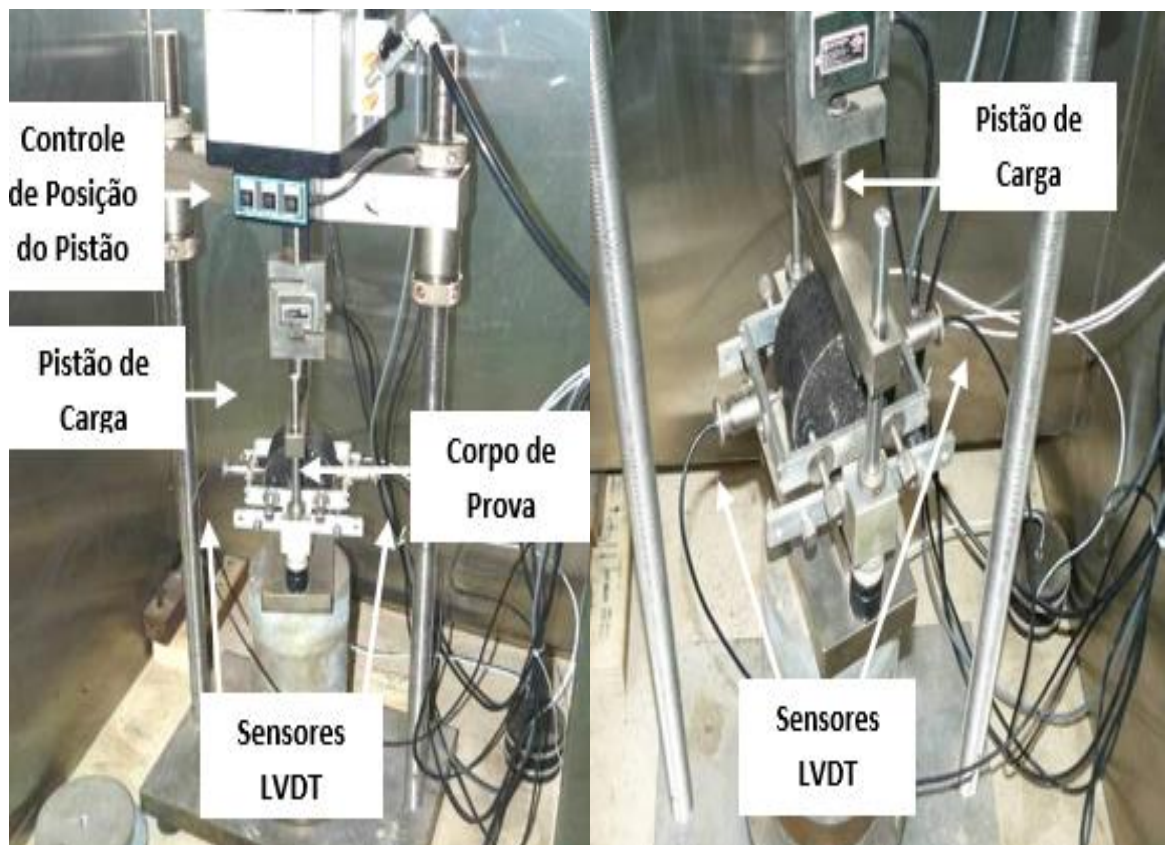
P – % da força axial da resistência à tração, em N

$\Delta$  – Deslocamento medido, em mm

h – Média da altura do corpo de prova, em mm

$\nu$  – Coeficiente de Poisson

Figura 26: Ensaio de Módulo de Resiliência na UTM 14

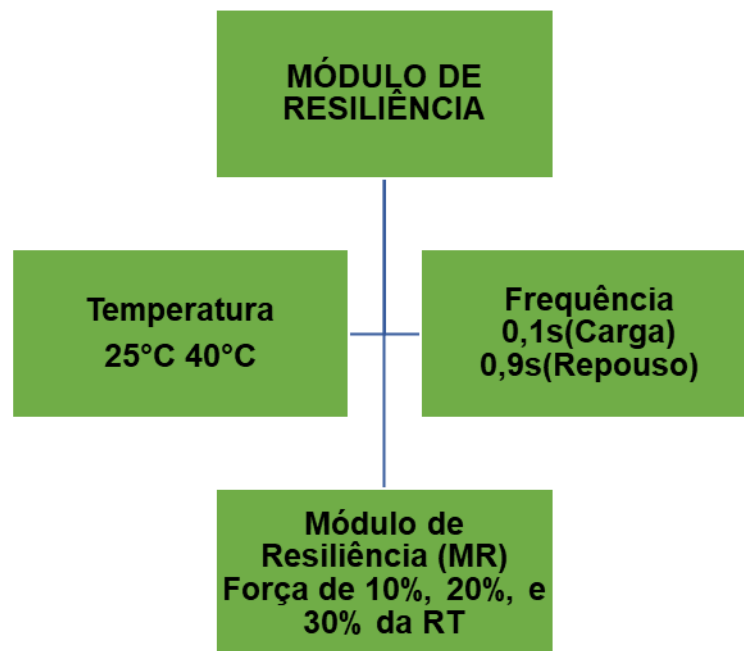


Fonte: VALENÇA, 2012

TABELA 6: Especificações dos Protocolos para ensaio de Módulo de Resiliência

Protocolos	°C	Frequência (Hz)	Tempo da Carga (s)	Leitores das Deformações	Ciclos	Carga	Poisson (v)
AS 2891.13.1	25	NI	0,004	Suporte	NI	$\Delta = 0,005 \pm 2\text{mm}$	NI
ASTM D4123	5, 25, 40	0,33; 0,5; 1	0,1 a 0,4	Suporte ou colado	50 a 200	RT = 10% a 50%	NI
AASHTO TP-31-96	5, 25, 40	1	0,1	Suporte	$\geq 30$	RT = 5%, 15%, 30% (25°C)	0,10 a 0,50
LTPP P07	5, 25, 40	1	0,1	Colado nas faces	20-150	$\Delta = 0,038\text{mm}$	0,10 a 0,50
1-28-A DO NCHRP	25	1	0,1	Colado nas faces	NI	RT = 15% (25°C)	0,25 a 0,45
BSI DD 213	2, 10, 20	0,33	$0,124 \pm 0,004$	Suporte	NI	$\Delta = 0,005 \pm 2\text{mm}$	0,35
EN 12697 26/2004	2, 10, 20	NI	$0,124 \pm 0,004$	Suporte	NI	$\Delta = 0,005 \pm 2\text{mm}$	0,35
DNER 135/10	25	NI	NI	Suporte	NI	NI	0,30

Figura 27: Fluxograma adotado para o ensaio de Módulo de Resiliência



Fonte: BARBOSA, 2016

No que concerne aos procedimentos adotados para o ensaio de Módulo de Resiliência, foram seguidas algumas etapas após a confecção dos corpos de prova: i) Mediu-se as alturas e os diâmetros dos corpos de prova; ii) Encaixou-se as molduras de apoio dos LVDT's, fixando-a e prendendo ao corpo de prova; iii) Inseriu-se o friso metálico superior e leva-se o conjunto para a prensa; iv) Inseriu-se os dados da amostra no software, selecionando os protocolos adotados, para o trabalho, ASTM D4123-82//AASHTO\_TP31 e os parâmetros de controle como temperatura (40°C e 60°C), tempo de pulso de aplicação da carga (100), tempo total de um ciclo do pulso, quantidade de pulsos de condicionamento (1000), coeficiente de Poisson (adotado 0,35) e a porcentagem de RT previamente calculada (10%, 20% e 30% da Resistência à Tração).

Levando-se em conta os protocolos definidos, os corpos de prova foram submetidos aos esforços de 10%, 20% e 30% da Resistência à Tração determinada, com frequência de 1Hz, período de carregamento de 0,1s e descarregamento 0,9s. Os dois sensores LVDT's registraram os deslocamentos horizontais que ocorreram com a aplicação da força, ajustados e fixados com auxílio dos parafusos de ajuste fino e dado início do ensaio.

Os testes foram realizados em duas temperaturas, para uma dada temperatura, acionou-se o controle de temperatura da câmara ambiental até que o corpo de prova pudesse atingir o equilíbrio térmico, controlando-se a temperatura durante todo o ensaio. Ao final do ensaio, o valor do módulo de resiliência foi dado diretamente pelo software, que corresponde a média aritmética dos cinco últimos pulsos de carregamento, que forneceu o resultado para cada percentual da Resistência à Tração requerido.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Neste Capítulo apresentam-se os resultados e a discussões dos ensaios que foram descritos na metodologia deste trabalho: a caracterização dos materiais partícipes das misturas asfálticas, a dosagem das misturas asfálticas e a caracterização mecânica, por meios dos ensaios de Resistência à Tração e Módulo de Resiliência.

### **4.1. Caracterização dos Materiais**

#### **4.1.1 Ligante Asfáltico**

Os ensaios de caracterização relacionados ao ligante asfáltico, segundo especificação 095/2006 do DNIT, podem ser observados na tabela 7, que mostram características como penetração, ponto de amolecimento e solubilidade em tricloroetileno.

Concernente as considerações sobre os ligantes asfálticos, na pesquisa foi empregado o CAP 50/70, que é o cimento asfáltico utilizado costumeiramente nas obras de pavimentação na cidade de Manaus, com a caracterização mostrada nas tabelas 8 e 9 e figura 28. Elas mostram que: 1) à 25°C a penetração forneceu resultado igual a 69 mm; 2) os valores do ponto de amolecimento e da solubilidade em tricloroetileno estão próximos dos descritos pela ANP; 3) o ponto de fulgor apresenta resultado superior ao da norma, demonstrando uma maior segurança para se trabalhar o ligante; 4) a ductilidade possui boa consistência; 5) a viscosidade a 135°C e 150°C, apresentou valores elevados ao ser comparada com a do material referência, estando, porém, de acordo com o recomendado a temperatura de 177°C; 6) os valores característicos para tempos posteriores ao processo de envelhecimento das amostras, em estufa de filme fino rotativo (RTFOT), está conforme a norma, exceção apenas para a Penetração Retida. Desse modo, o CAP estudado atendeu as exigências normativas.

Tabela 7: Especificação Brasileira CAP (DNIT 095/2006-EM)

Características	Und	Limites			
		CAP 30 45	CAP 50 70	CAP 85 100	CAP 150 200
Penetração (100 g, 5s, 25°C)	0,1mm	30 45	50 70	85 100	150 200
Ponto de amolecimento, mín	°C	52	46	43	37
Viscosidade SayboltFurol					
a 135 °C, mín	s	192	141	110	80
a 150 °C, mín	s	90	50	43	36
a 177 °C	s	40 150	30 150	15 60	15 60
Viscosidade Brookfield					
a 135°C, mín	cP	374	274	214	155
a 150 °C, mín.	cP	203	112	97	81
a 177 °C, mín	cP	76 285	57 285	28 114	28 114
Índice de susceptibilidade térmica		(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)
Ponto de fulgor mín	°C	235	235	235	235
Solubilidade em tricloroetileno, mín	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5
Ductilidade a 25° C, mín	cm	60	60	100	100
Varição em massa, máx	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5
Ductilidade a 25° C, mín	cm	10	20	50	50
Aumento do ponto de amolecimento, máx	°C	8	8	8	8
Penetração retida, mín	%	60	55	55	50

FONTE – DNIT, 2006

Tabela 8: Caracterização do Ligante Asfáltico

Características	Método	Unid	ANP (2005) CAP 50/70	CAP 50/70
-----------------	--------	------	-------------------------	-----------

Penetração	D5	0,1 mm	50-70	69
Ponto de amolecimento	D36	°C	46	49,7
Ponto de fulgor	D92	°C	235	318
Solubilidade em tricloroetileno	D2042	% massa	99,5	99,9
Ductilidade	D113	cm	60	> 100
Densidade relativa a 20/4C	D70	N/A	-	0,998

Tabela 9 - Viscosidades e Parâmetros (após Envelhecimento) do Ligante Asfáltico

Características	Método	Unid	ANP (2005) CAP 50/70	CAP 50/70
Viscosidade Saybolt Furol a 135°C	E 102	s	141	283
Viscosidade Brookfield a 135°C	D4402	cp	274	539
Viscosidade Saybolt Furol a 150°C	E 102	s	50	140,7
Viscosidade Brookfield a 150°C	D4402	cp	112	279,8
Viscosidade Saybolt Furol a 177°C	E 102	s	30-150	50,8
Viscosidade Brookfield a 177°C	D4402	cp	57-285	96,8
RTFOT variação em % massa	D2872	%	0,5	0,04
RTFOT aumento do ponto de amolecimento	D36	°C	8	7,1
RTFOT penetração retida	D5	%	55	63

Figura 28: Ensaio de Penetração



Fonte: Autor

#### 4.1.2 Agregados

Os agregados empregados nessa pesquisa são os mesmos empregados por Silva (2014) e Silva (2013), objetivando dar continuidade aos estudos do emprego do material alternativo ASAC, produzido com base em processos industriais, descritos na metodologia deste trabalho. Desse modo, a caracterização física dos agregados está disposta nas tabelas seguintes, já disponíveis nos trabalhos citados:

Tabela 10: Caracterização Física dos agregados

Análise	Amostra	
	ASAC SUC	AREIA MAO
Gsb(g/cm <sup>3</sup> )	1,855	2,632
Gsbssd(g/cm <sup>3</sup> )	2,133	
Gsa(g/cm <sup>3</sup> )	2,571	2,692
Absorção (%)	15	0
Wul (kg/m <sup>3</sup> )	1062	
Wur (kg/m <sup>3</sup> )	1126,35	1676
Adesividade	Satisfatória	

Tabela 11: Distribuição Granulométrica Agregado Graúdo (ASAC) e Agregado Miúdo (Areia Manaus)

Abertura(mm)	Porcentagem que passa	
	ASAC	Areia MAO
25	100	100
19	97,9	100
12,5	73,7	100
9,5	58,5	100
4,75	16,8	99,8
2,36	3,5	98,8
1,18	2,2	94,6
0,6	1,7	77,9
0,3	1,4	35,6
0,075	0,4	2,6

O material de enchimento empregado na mistura asfáltica foi o cimento Portland do tipo CII-Z-32, o qual atendeu todos os limites da especificação estabelecida, que pode ser verificado na tabela 12, com massa específica real igual a 3,15 g/cm<sup>3</sup>.



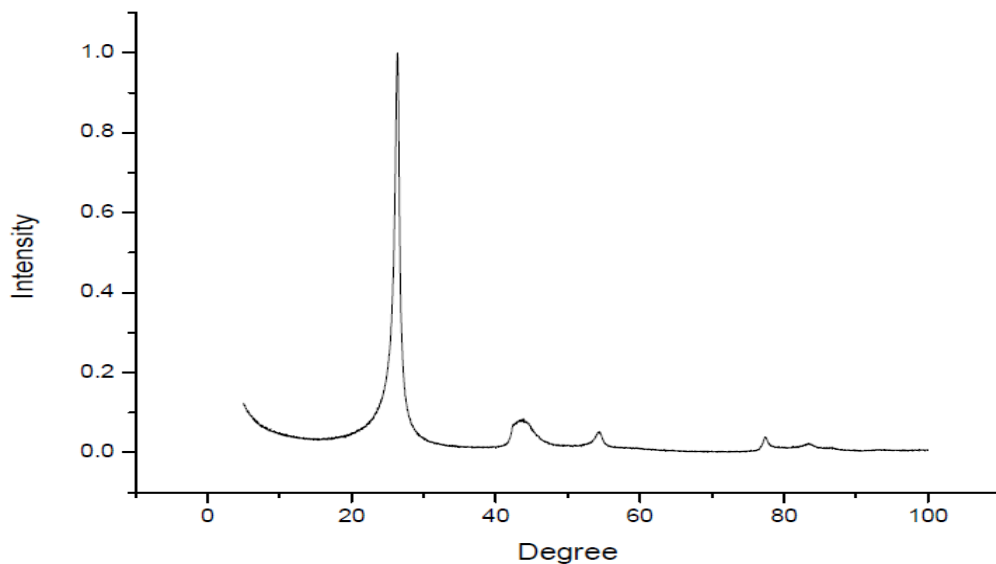
Tabela 12: Especificação material de enchimento

Abertura da malha (mm)	% em peso, passando	
	Especificação	Cimento Portland
0,42	100	100
0,18	95-100	100
0,075	65-100	100

#### 4.1.3. Nanomaterial de Multicamadas de Grafeno

O difratograma da figura 29 representa o nanomaterial de multicamadas de grafeno, que foi adicionado ao ligante asfáltico para sua modificação, e acrescentado posteriormente na mistura asfáltica. Esse material passou pelo processo de 4 horas de moagem, tendo sido empregado na proporção de 4% do ligante asfáltico, o que resultou nessas características que podem ser visualizadas naquela figura.

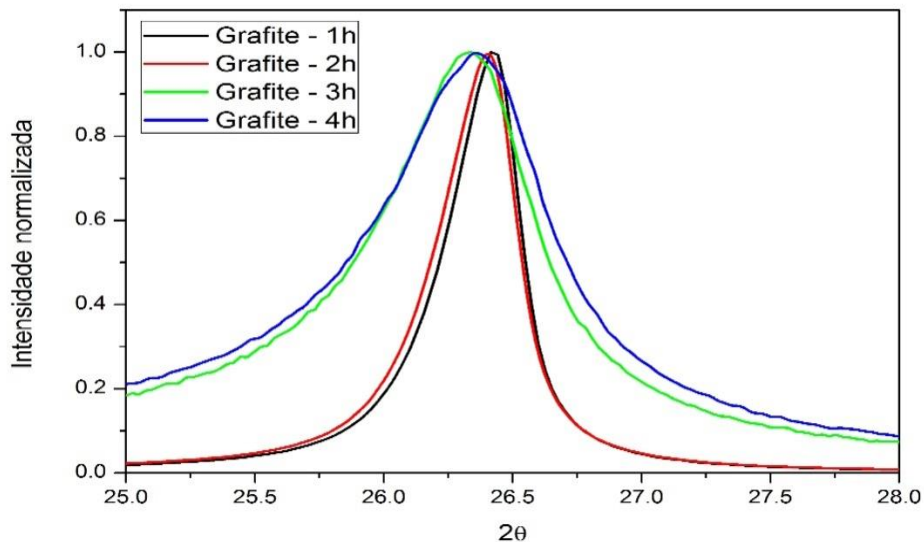
Figura 29: Difratograma Nanomaterial de multicamadas de grafeno



Ao se comparar com os demais tempos de moagem, através do difratograma da figura 30, nota-se que os seus picos apresentam alargamento, o que demonstra

que o material se torna nanométrico, é o que pode ser notado no ângulo  $2\theta$  aproximadamente  $26,2^\circ$ .

Figura 30: Difratoograma diversos tempos de moagem do Grafite



#### 4.2. Dosagem da Mistura Asfáltica

Conforme a norma do DNIT para a determinação da resistência à Tração por Compressão Diametral, o corpo de prova confeccionado destinado a esse ensaio teve forma cilíndrica, com altura entre 3,5cm a 6,5 cm e diâmetro de 10cm, com variação de 2mm para mais ou para menos. Na compatibilização das dimensões do corpo de prova à granulometria fixou-se o tamanho máximo do agregado em 12,5mm.

Notando-se que o tamanho máximo do agregado graúdo empregado no trabalho é de 12,5 mm, foi necessário realizar o seu fracionamento em agregado, de modo a ajustá-lo às dimensões estabelecidas em norma do corpo de prova e permitir o seu enquadramento na faixa Superpave. Desse modo, descartou-se a parcela que passou na peneira de abertura 2,36mm, o que resultou em um agregado que se

pode denominar de ASAC fracionado, com a sua granulometria disposta na tabela 13:

Tabela 13: Distribuição Granulométrica do ASAC fracionado

Abertura (mm)	ASAC Fracionado % passa
25	100
19	100
12,5	100
9,5	78,3
4,75	18,9
2,36	0,0
1,18	0,0
0,6	0,0
0,3	0,0
0,075	0,0

No tocante a dosagem mineral, os dados obtidos por meio da Metodologia Superpave estão destacados na tabela 14. Quanto a obtenção do teor de projeto foi concretizada através do procedimento mostrado na tabela 15.

Tabela 14: Distribuição Granulométrica do ASAC fracionado nas misturas

Componentes	Mistura 1	Mistura 2	Mistura 3
ASAC Fracionado	53,66	62,00	50,00
Areia MAO	42,44	34,00	45,00
Cimento Portland	3,90	4,00	5,00

Tabela 15: Roteiro para obtenção do teor de projeto

1. Selecionar três misturas com granulometria diferentes
2. Estimar o teor de betume inicial
3. Compactar dois corpos de prova para mistura com teor de betume inicial (ASTM D 6925)
4. Preparar duas amostras de cada mistura e determinar Gmm (ASTM D 2041)
5. Determinar Gmb dos corpos de prova compactados (ASTM D1188 ou ASTM D2726)

6. Calcular e avaliar os parâmetros dos corpos de prova Ndes ou Vv, %Gmm a N <sub>max</sub> , VAM, RBV e P/A)
7. Baseado nos valores obtidos, estimar os novos teores de ligante para atender %Gmm e Ndes e estimar os demais parâmetros
8. Selecionar a mistura que indique maior folga no atendimento dos parâmetros estimados e prosseguir os testes
9. Para a mistura granulométrica selecionada, deve-se compactar dois corpos de prova para o teor de ligante estimado, para o teor de ligante estimado $\pm 0,5\%$ e para o teor de ligante estimado $+1,0\%$
10. Preparar duas amostras da mistura com teor de ligante estimado e determinar Gmm
11. Calcular a Gmm para as demais misturas pela a relação Gse e teor de betume
12. Determinar o Gmb dos corpos de prova compactados
13. Calcular e avaliar os parâmetros dos corpos de prova compactados (% Gmm a N <sub>ini</sub> , %Gmm a Ndes ou Vv, %Gmm a N <sub>max</sub> , VAM, RBV e P/A)
14. Gerar gráficos de cada um dos parâmetros em função dos teores de ligante
15. A mistura com teor de betume deve atender aos requisitos. Caso isso não ocorra, o teor de projeto correspondente a Vv de 4% pode ser obtido por meio do gráfico e também os demais parâmetros

Empregou-se nos estudos o ligante asfáltico CAP 50/70, concretizando para cada mistura, duas compactações no Compactador Giratório Superpave, nas quais forneceram os resultados para os parâmetros, dispostos na tabela 16 e tabela 17. Admitiu-se os teores de ligante nos valores de 10,6%, 11,4% e 9,6%, para as misturas 1, 2 e 3, respectivamente. No início, nota-se que nenhuma das misturas, atendeu ao critério de compactação mínima de 96% em relação ao Gmm, havendo outros parâmetros com valores fora do padrão, como o mostrado na tabela 18:

Tabela 16: Parâmetros de compactação para o corpo de prova 1 de cada mistura

CP	N de giros	Corpo de Prova 1						
		Massa total [g]	Gmm [g/cm <sup>3</sup> ]	Altura [mm]	Gmb (medida) [g/cm <sup>3</sup> ]	Gmb (estimada) [g/cm <sup>3</sup> ]	Gmb (Corrigida) [g/cm <sup>3</sup> ]	% Gmm
100	<i>N<sub>ini</sub></i>	8		123,63	-	1,870	1,884	90,9
	<i>N<sub>projeto</sub></i>	100		116,01	-	1,993	2,008	96,8
Mistura 1	<i>N<sub>max</sub></i>	160	1816,2	2,073	115,07	2,024	2,010	97,6

Mistura 2	$N_{ini}$	8			125,35	-	1,791	1,808	88,8
	$N_{projeto}$	100			113,07	-	1,986	2,005	98,5
	$N_{max}$	160	1763,5	2,036	112,37	2,017	1,998	2,017	99,1
Mistura 3	$N_{ini}$	8			125,18	-	1,871	1,891	88,6
	$N_{projeto}$	100			117,11	-	2,000	2,021	94,8
	$N_{max}$	160	1839,6	2,133	116,37	2,034	2,013	2,034	95,4

Tabela 17: Parâmetros de compactação para o corpo de prova 2 de cada mistura

CP	N de giros	Corpo de Prova 1							
		Massa total [g]	Gmm [g/cm <sup>3</sup> ]	Altura [mm]	Gmb (medida) [g/cm <sup>3</sup> ]	Gmb (estimada) [g/cm <sup>3</sup> ]	Gmb (Corrigida) [g/cm <sup>3</sup> ]	% Gmm	
100	$N_{ini}$	8			123,37	-	1,865	1,876	90,5
	$N_{projeto}$	100			115,27	-	1,996	2,008	96,9
	$N_{max}$	160	1807,4	2,073	114,35	2,024	2,012	2,024	97,6
Mistura 1	$N_{ini}$	8			125,53	-	1,803	1,821	89,4
	$N_{projeto}$	100			113,96	-	1,986	2,006	98,5
	$N_{max}$	160	1777,7	2,036	113,65	2,011	1,992	2,011	98,8
Mistura 2	$N_{ini}$	8			125,56	-	1,880	1,896	88,9
	$N_{projeto}$	100			117,56	-	2,008	2,025	94,9
	$N_{max}$	160	1853,6	2,133	116,82	2,038	2,020	2,038	95,5

Tabela 18: Avaliação dos parâmetros obtidos nos teores de ligante iniciais

Misturas	Gmb corrigido [%Gmm]			% de vazios (Vv)	VAM	Avaliação	
	Teste	$N_{inicial}$	$N_{projeto}$				$N_{máximo}$
Mistura 1		90,7	96,9	97,6	3,1	16,9	Não atende
Mistura 2		89,1	98,5	98,9	1,5	15,4	Não atende
Mistura 3		88,8	94,9	95,5	5,1	16,5	Não atende
Critérios		<=89	96	<=98	=4	>=14	

Baseado nos parâmetros obtidos a partir das tentativas iniciais, entendeu-se que a mistura 2, com menor teor de ligante, poderia preencher todos os requisitos necessários. Desse modo, foi a mistura escolhida para realizar as novas tentativas, composta por teores de ligante nos valores de 9,9%, 10,4%, 10,9% e 11,4%, com resultados mostrados na tabela 21. Observa-se que nesse novo ciclo de tentativas, a mistura 2, com 10,9% de teor de ligante, atende os requisitos, o que o torna o teor ótimo de ligante.

Tabela 19: Parâmetros de compactação para o corpo de prova 1 da mistura

Teor de Ligante	N de giros	Corpo de Prova 1						
		Massa total [g]	Gmm [g/cm <sup>3</sup> ]	Altura [mm]	Gmb (medida) [g/cm <sup>3</sup> ]	Gmb (estimada) [g/cm <sup>3</sup> ]	Gmb (Corrigida) [g/cm <sup>3</sup> ]	% Gmm

9,9	$N_{ini}$	8	949,4	2,071	70,65	-	1,711	1,767	85,3
	$N_{projeto}$	100			63,75	-	1,896	1,958	94,6
	$N_{max}$	160			63,04	1,980	1,918	1,980	95,6
10,4	$N_{ini}$	8	959,9	2,059	69,80	-	1,751	1,800	87,4
	$N_{projeto}$	100			63,77	-	1,917	1,970	95,7
	$N_{max}$	160			63,11	1,991	1,937	1,991	96,7
10,9	$N_{ini}$	8	964,7	2,047	69,91	-	1,757	1,783	87,1
	$N_{projeto}$	100			63,44	-	1,936	1,965	96,0
	$N_{max}$	160			62,81	1,985	1,956	1,985	97,0
11,4	$N_{ini}$	8	952,2	2,036	68,27	-	1,776	1,804	88,6
	$N_{projeto}$	100			61,83	-	1,961	1,992	97,8
	$N_{max}$	160			61,55	2,001	1,970	2,001	98,3

Tabela 20: Parâmetros de compactação para o corpo de prova 2 da mistura 2

Teor de Ligante	N de giros	Massa total [g]	Gmm [g/cm <sup>3</sup> ]	Corpo de Prova 1				% Gmm	
				Altura [mm]	Gmb (medida) [g/cm <sup>3</sup> ]	Gmb (estimada) [g/cm <sup>3</sup> ]	Gmb (Corrigida) [g/cm <sup>3</sup> ]		
9,9	$N_{ini}$	8	970,4	2,071	70,78	-	1,746	1,754	84,7
	$N_{projeto}$	100			64,54	-	1,914	1,924	92,9
	$N_{max}$	160			63,86	1,944	1,935	1,944	93,9
10,4	$N_{ini}$	8	947,2	2,059	69,35	-	1,739	1,742	84,6
	$N_{projeto}$	100			62,48	-	1,930	1,934	93,9
	$N_{max}$	160			61,77	1,956	1,952	1,956	95,0
10,9	$N_{ini}$	8	951,7	2,047	69,82	-	1,736	1,778	86,9
	$N_{projeto}$	100			63,18	-	1,918	1,965	96,0
	$N_{max}$	160			62,46	1,988	1,940	1,988	97,1
11,4	$N_{ini}$	8	954,9	2,036	69,30	-	1,754	1,782	87,5
	$N_{projeto}$	100			62,58	-	1,943	1,973	96,9
	$N_{max}$	160			61,98	1,992	1,962	1,992	97,8

Tabela 21: Avaliação dos parâmetros obtidos nos teores de ligante iniciais

Teor de Ligante	Gmb corrigido [%Gmm]			% de vazios	VAM	RBV	P <sub>te</sub>	Pó/asfalto efetivo	Avaliação
	$N_{inicial}$	$N_{projeto}$	$N_{máximo}$						
9,9	85	93,7	94,7	6,3	16,7	62	5,5	0,89	Não
10,4	86	94,8	95,8	5,2	16,7	68	6,0	0,81	Não
10,9	87	96,0	97,0	4,0	16,6	75	6,5	0,75	Atende
11,4	88,1	97,4	98,1	2,6	16,4	83	7,1	0,69	Não
Critérios	<=89	96	<=98	=4	>=14	>=14		0,6 a 1,2	

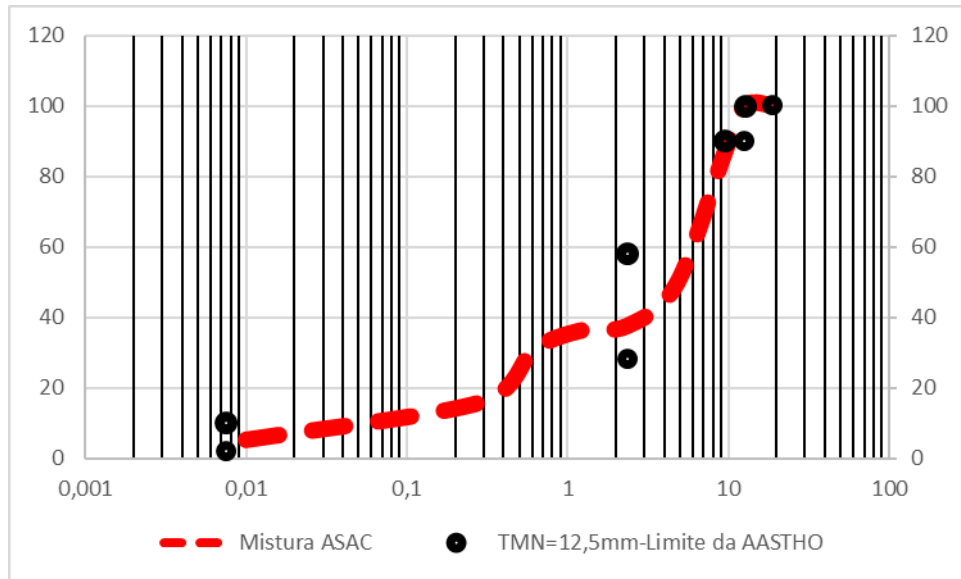
Silva (2011) determinou o teor de projeto do ligante para a mistura com o agregado graúdo do tipo ASAC pelo método do 3º Distrito Rodoviário Federal (3º DRF) do DNIT, o qual busca o maior equilíbrio entre os valores do Volume de Vazios (Vv) e da Relação Betume-Vazios (RBV), determinados através da Metodologia

Marshall, resultando em 9,4%, que é inferior ao valor empregado nesta pesquisa, de 10,9%.

Tabela 22: Distribuição Granulométrica Mistura com ASAC

Peneiras- ASTM	Peneiras (mm)	Porcentagem de Material para a mistura (%)			Dosagem (%)	TMN 12,5mm	
		ASAC	AREIA	FILER		Limite inferior (%)	Limite superior
		62	34	4			
1 1/12"	38,1	62	34	4	100		
1"	25,4	62	34	4	100	100	100
3/4"	19,1	62	34	4	100	100	100
1/2"	12,7	62	34	4	100	90	100
3/8"	9,5	48,55	34	4	86,55	36,83	110,49
N°04	4,8	11,72	33,9	4	49,62	41,98	73,23
N°08	2,36	0,0	33,59	4	37,59	31,80	47,70
N°16	1,18	0,0	32,16	4	36,16	25,19	40,69
N°30	0,600	0,0	26,49	4	30,49	20,92	31,38
N°50	0,300	0,0	12,10	4	16,1	12,58	15,72
N°200	0,0075	0,0	0,884	3,50	4,384	4,43	5,54

Figura 31: Curva Granulométrica da Mistura com ASAC



Fonte: Autor

Como o teor de projeto de ligante obtido pela Metodologia Superpave foi superior ao determinado pelo método tradicional, nota-se que o revestimento asfáltico proveniente do Método Marshall está mais passível de apresentar trincamentos, enquanto que a originada da Metodologia Superpave está mais propensa a deformações permanentes. Mas, para a melhor escolha do método a ser adotado, há que se considerar as características ambientais e de tráfego local.

### 4.3. Caracterização Mecânica

Os testes foram realizados em temperaturas diferentes, para o ensaio de Resistência à Tração, os corpos de prova foram submetidos à 25°C, 40°C e 60°C, e para o Módulo de Resiliência, as temperaturas foram 25°C e 40°C, houve a preocupação de aferir os dados de ruptura, do material em equilíbrio térmico. Já que, 25°C corresponde a temperatura ambiente do laboratório climatizado, foi necessário manter os corpos de prova nas temperaturas de 40°C e 60°C pelo menos 1 hora na estufa.

Figura 32: Ensaio de Módulo de Resiliência à 40°C (Esquerda) / Aferição de temperatura após ensaio de Resistência à Tração à 40°C (Direita)





Fonte: Autor

Figura 33: Ensaio de Resistência à Tração à 60°C (esquerda) / Após ensaio de Resistência à Tração à 60°C



Fonte: Autor

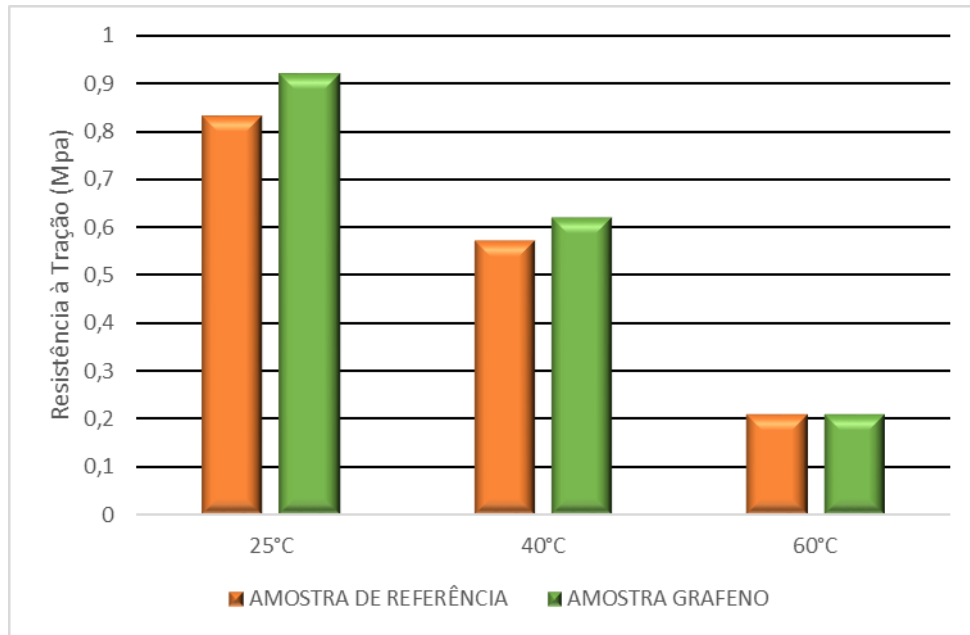
#### 4.3.1. Resistência à Tração (RT)

Nesta subseção apresentam-se os resultados referentes aos testes de Resistência à Tração por Compressão Diametral, a temperaturas de 25°C, 40°C e 60°C. Foram utilizados três tipos de corpos prova: 1) a mistura de referência, constituído pelo concreto asfáltico tendo o ASAC como agregado; 2) a mistura grafeno, cujo ligante foi modificado com nanomaterial de multicamadas de grafeno; 3) a mistura não envelhecida, sem as multicamadas de grafeno e não envelhecida.

Na figura 34 apresentam-se os valores de Resistências à Tração por Compressão Diametral para as amostras envelhecidas (submetidas ao processo de envelhecimento). Compara-se os resultados das misturas asfálticas com o ligante modificado por nanomaterial de multicamadas de grafeno, em cor verde, que identificaremos simplesmente por “grafeno”, com o material de referência, em cor laranja. É perceptível a influência da adição do nanomaterial no comportamento mecânico desse revestimento asfáltico, que proporciona aumento nos valores de Resistência à Tração.

Nota-se também a influência da temperatura de serviço nos valores de Resistência à Tração. Na figura citada, observa-se que a 25°C os dois tipos de amostra assinalados, a do material de referência e a do “grafeno”, apresentam melhor desempenho mecânico. Ao serem submetidos a temperaturas maiores, os valores de RT decaem continuamente, como mostram os resultados para 40 °C e 60°C.

Figura 34: Resistência à tração do material referência (cor laranja) e do mesmo material tendo o ligante modificado com nanomaterial de multiccadas de grafeno (cor verde).



A adição do nanomaterial de multicamadas de grafeno confere à mistura asfáltica um aumento nos resultados de Resistência à Tração, que pode ser visto na figura 35 e na tabela 23. À temperatura de 25°C o material cujo ligante é modificado com multicamadas de grafeno apresenta um aumento da Resistência à Tração de 9,8% em relação ao material de referência. Na temperatura de 40°C também houve aumento no desempenho mecânico, nesse caso de 8,1%. À temperatura de 60°C, a adição do grafeno quase não proporcionou variação nos valores de Resistência à Tração.

Figura 35: Acréscimo de Resistência à Tração devido a adição de Nanomaterial de grafeno

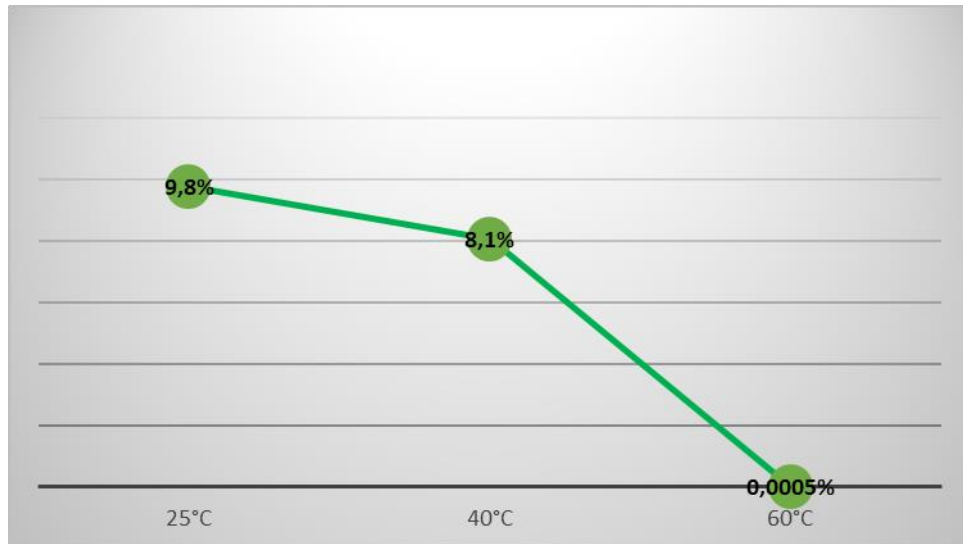


Tabela 23: Acréscimo de Resistência à Tração com a adição de nanomaterial de grafeno

Mistura	Temperatura	Acréscimo de RT
Grafeno	25°C	9,8%
	40°C	8,1%
	60°C	0,0005%

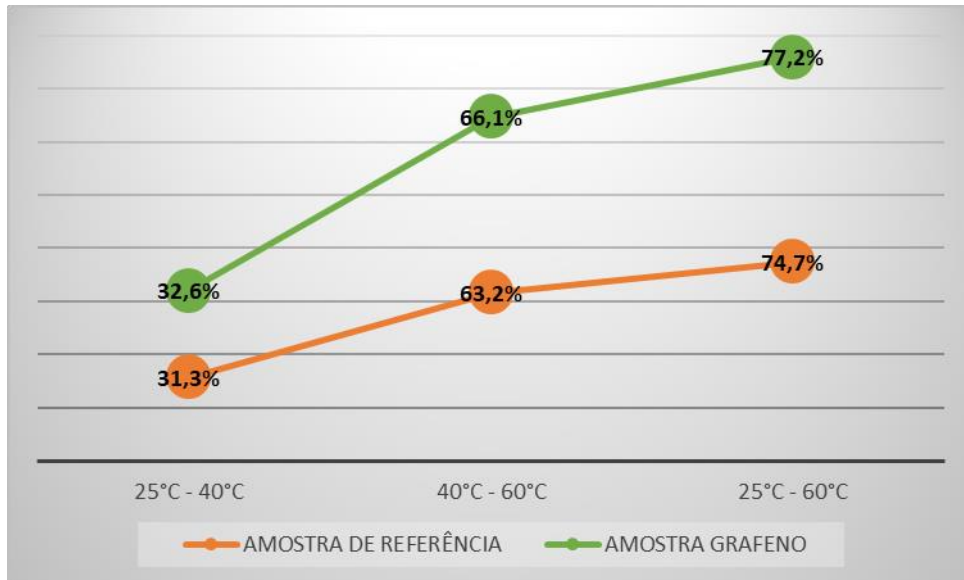
Tabela 24: Decréscimo de Resistência à Tração com a Temperatura (Mistura de Referência e Mistura Grafeno)

Mistura	Perdas		
	25°C→40°C	40°C→60°C	25°C→60°C
REFERÊNCIA	31,3%	63,2%	74,7%
GRAFENO	32,6%	66,1%	77,2%

O acréscimo de temperatura produziu a diminuição da Resistência à Tração para as duas misturas asfálticas em estudo, a do material de referência e a do material modificado com multicamadas de grafeno. Ao variar de 25°C para 40°C, a RT do material modificado reduziu de 32,6% e a do material de referência 31,3%. Com o aumento da temperatura de 40°C para 60°C, a perda devido ao aumento da temperatura foi notadamente maior para os dois tipos de compósito, cerca de 66,1% para o material modificado e 63,2% para a de referência. Mas, o maior decréscimo observado, foi na variação de 25°C para 60°C, que representou cerca de 77,2% para

o corpo de prova modificado e 74,7% para o de referência. Tais observações podem ser visualizadas na tabela 24 e figura 36:

Figura 36: Gráfico de Decréscimo de Resistência à Tração com a Temperatura (Amostra de Referência e Amostra Grafeno)



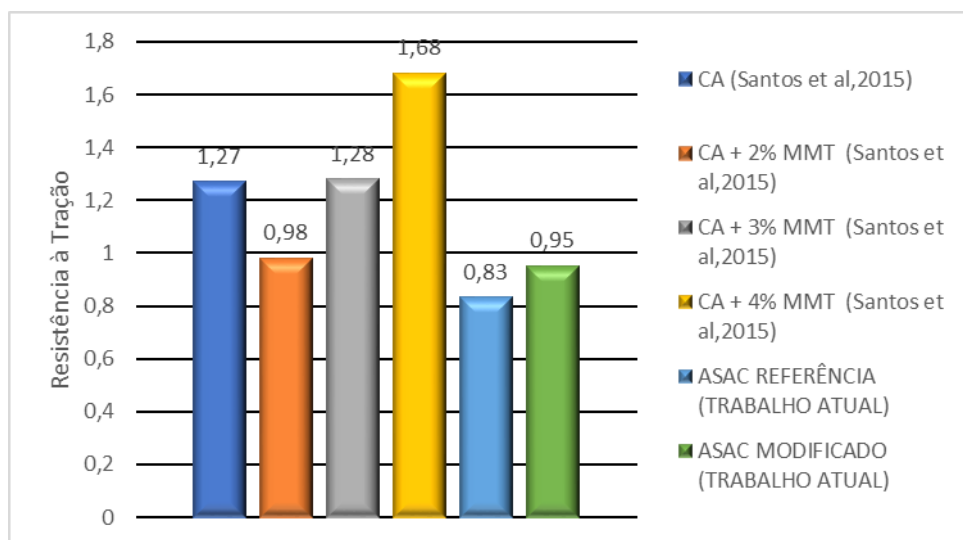
Le et al., (2016) concretizaram ensaios de flexão nos quais se obtiveram resistência à flexão superior a baixas temperaturas para as misturas asfálticas que utilizaram ligante asfáltico modificado por grafeno, na proporção de 3% a 6% do ligante, relacionado ao ligante não modificado. Observou-se, na sua pesquisa também que a modificação do ligante asfáltico pelo grafeno melhora o desempenho na compactação, diminuindo o número de giros necessários no Compactador Giratório Superpave.

Hassani et al., (2017) estudaram o comportamento das propriedades mecânicas do pavimento de concreto por óxido de grafite que resultou no aumento da resistência à tração do cimento. Habid et al (2014) realizaram ensaios de caracterização do ligante modificado por grafeno na quantidade de 0,225% do peso do ligante e mesmo com uma quantidade tão reduzida de nanomaterial conseguiu observar uma ligeira alteração no comportamento elástico que pode melhorar a resistência à deformação do pavimento.

Pela escassez de estudos envolvendo o grafeno na pavimentação asfáltica realizou-se a comparação com outro modificador no ligante, a montmorilonita em diversas porcentagens.

Na figura 37, é possível visualizar os estudos realizados por Santos et al (2015), no qual pesquisaram o comportamento mecânico de misturas asfálticas do tipo concreto asfáltico, com brita como agregado graúdo, modificadas pela adição de montmorilonita nas porcentagens de 2%, 3% e 4%. Para cada uma das adições houve aumento nos valores de Resistência à Tração, do mesmo modo que acontece com o trabalho em estudo no qual a adição de 4% de nanomaterial de multicamadas de grafeno possibilita o aumento do desempenho mecânico da mistura asfáltica que emprega ASAC como agregado graúdo.

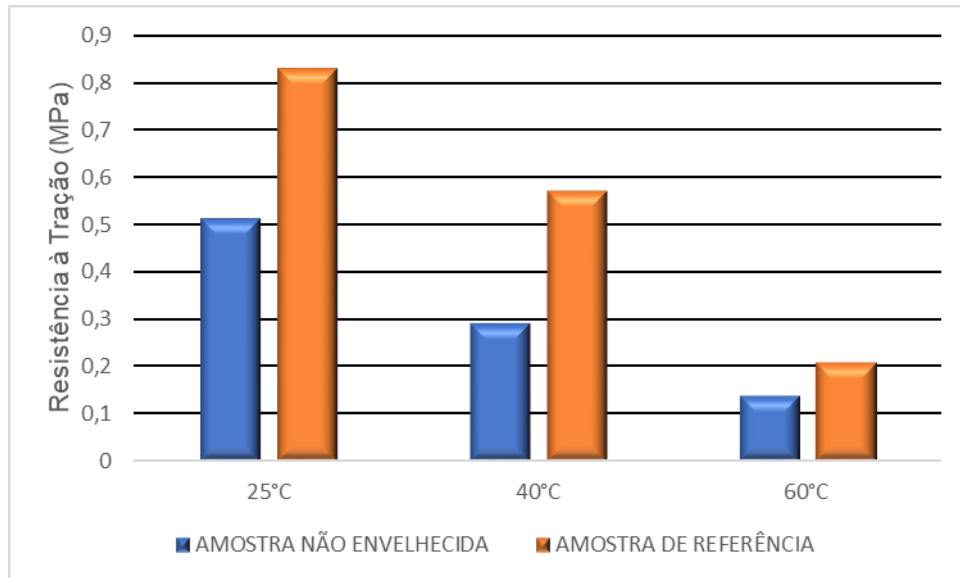
Figura 37: Gráfico Comparativo de Resistência à Tração (Mistura Referência e Modificada com ASAC e CA convencional com MMT em diversas porcentagens)



Na figura 38 é apresentado o conjunto das Resistências à Tração por Compressão Diametral concernente às misturas asfálticas do material de referência envelhecida (cor laranja) e não envelhecida (cor azul), que empregam o Agregado Sinterizado de Argila Calcinada como agregado Graúdo. É notadamente visível a influência do envelhecimento nas propriedades mecânicas desse revestimento asfáltico. Percebe-se também a influência da temperatura de serviço nos valores de Resistência à Tração. Nota-se que os compósitos asfálticos tiveram melhor

desempenho mecânico à temperatura de 25°C, diminuindo esse desempenho à temperatura de 40°C, e uma grande redução à temperatura de 60°C.

Figura 38: Gráfico Resistência à Tração (Amostra não envelhecida e Amostra do material de referência)



É visível a influência do processo de envelhecimento nos resultados de Resistência à Tração para todas as temperaturas, podendo ser conferidas na figura 39 e na tabela 25. À temperatura de 25°C houve aumento da Resistência à Tração de 63% com o processo de envelhecimento. O maior acréscimo de RT foi visualizado à 40°C, no qual o acondicionamento térmico por duas horas propiciou aumento de 97% desse valor. Há 60°C, nota-se cerca de 60% de aumento no valor do desempenho mecânico.

Figura 39: Gráfico do Acréscimo de Resistência à Tração com o

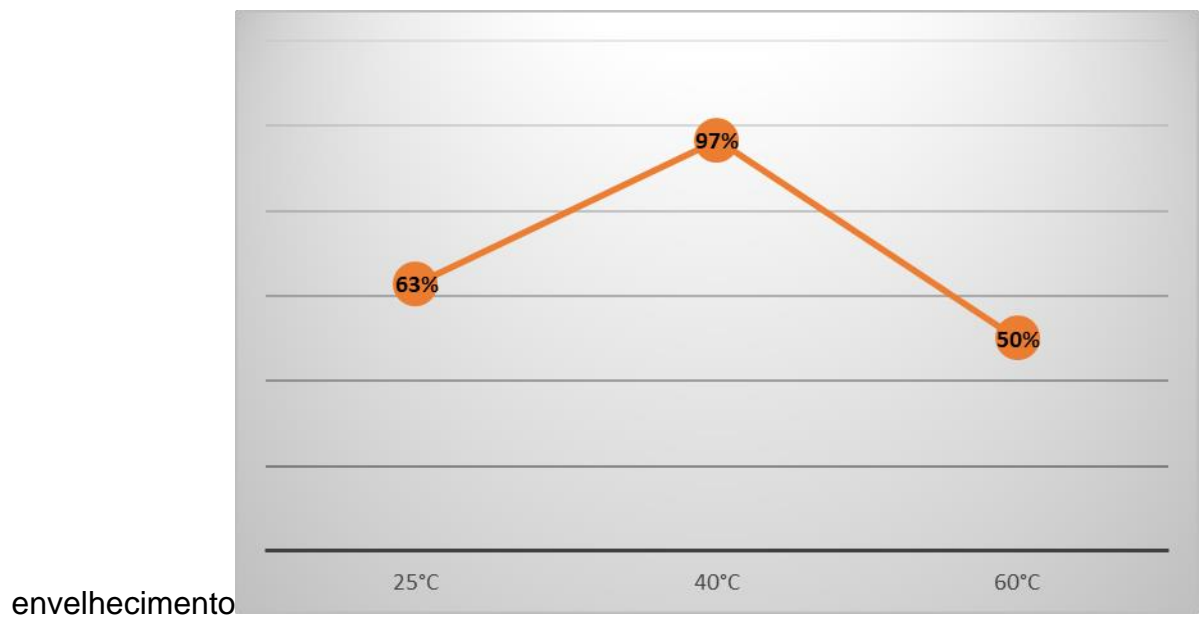


Tabela 25: Acréscimo da Resistência à Tração com o Envelhecimento

Mistura	Temperatura	Acréscimo de RT
Referência	25°C	63%
	40°C	97%
	60°C	50%

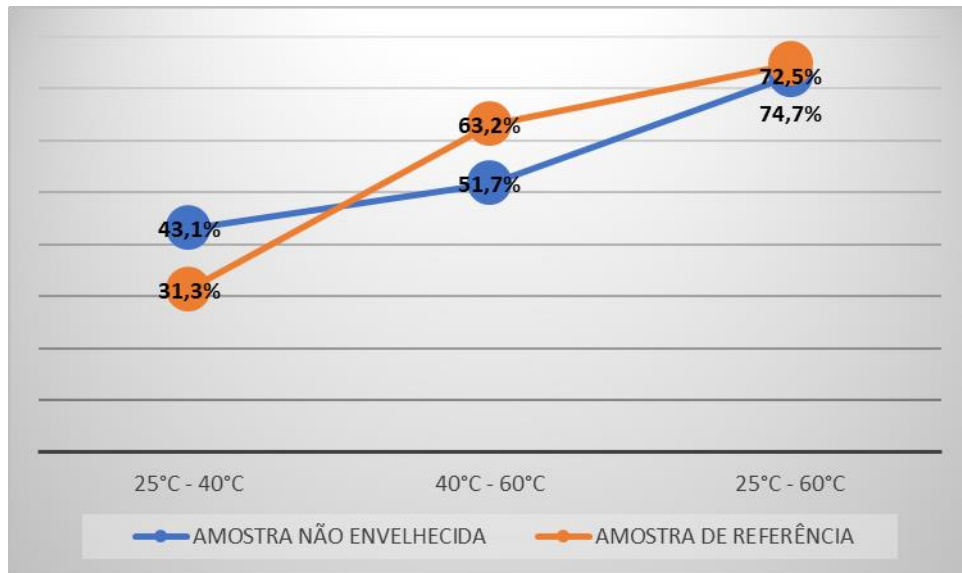
Nota-se que com o aumento de temperatura houve diminuição dos valores de Resistência à Tração para as duas misturas asfálticas em estudo, a de referência envelhecida e a não envelhecida. Quando a temperatura variou de 25°C para 40°C houve redução de 43,1% nos valores de RT para não envelhecida, enquanto que para de referência envelhecida esses valores foram de 31,3%. Com o aumento da temperatura de 40°C para 60°C, a perda proveniente da alteração da temperatura observada foi ainda maior para as duas amostras, cerca de 51,7% para a não envelhecida e 63,2% para a de referência envelhecida. No entanto, o maior decréscimo visualizado no trabalho foi na variação de 25°C para 60°C, que representou cerca de 72,5% para o corpo de prova não envelhecido e 74,7% para o de referência. Tais observações podem ser visualizadas na tabela 26 e figura 40:



Tabela 26: Decréscimo de Resistência à Tração com a Temperatura

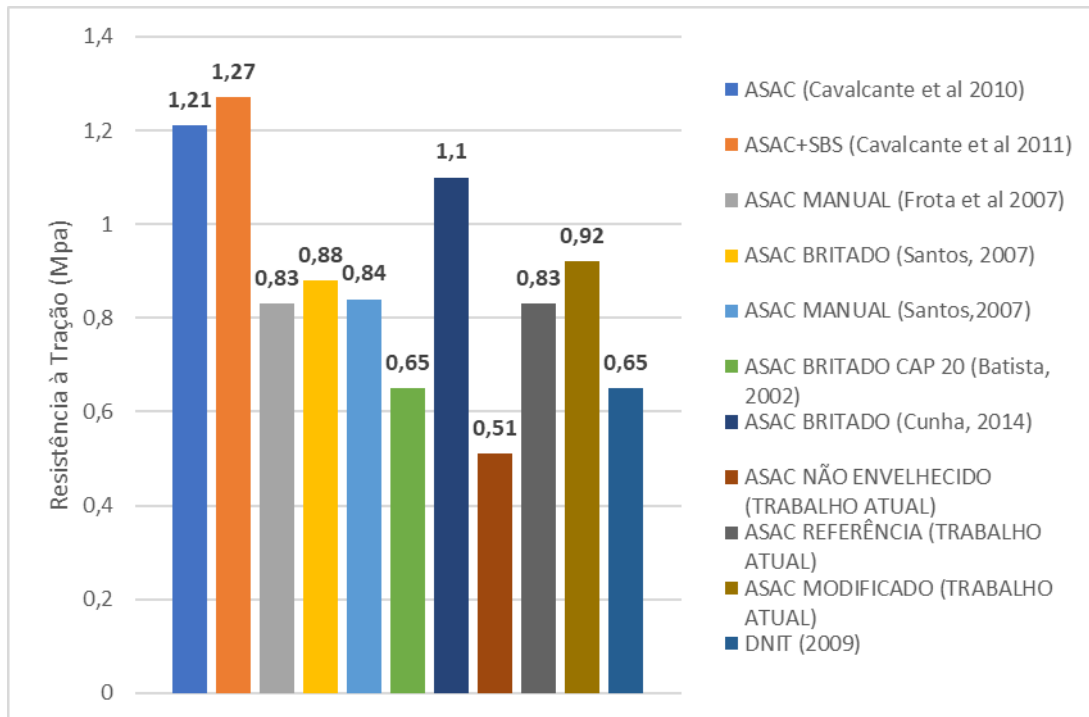
Mistura	Perdas		
	25°C→40°C	40°C→60°C	25°C→60°C
NÃO ENVELHECIDA	43,1%	51,7%	72,5%
REFERÊNCIA	31,3%	63,2%	74,7%

Figura 40: Gráfico de Decréscimo de Resistência à Tração com a Temperatura



No que concerne a literatura, os resultados encontrados com o trabalho, mostram-se satisfatórios, à medida que atendem aos requisitos mínimos normativos, salvo a mistura não envelhecida que ficou abaixo do pré-estabelecido pelo DNIT. A comparação dos resultados do trabalho atual com a literatura pode ser visualizada na figura 41. O destaque deve ser dado à mistura modificada, que teve aumento no seu desempenho mecânico quando comparada com a de referência dessa pesquisa.

Figura 41: Gráfico Comparativo de Resistência à Tração de Bibliografias Estudadas



#### 4.3.2. Módulo de Resiliência

Na execução do ensaio de Módulo de Resiliência adotou-se o coeficiente de Poisson de 0,35 para as duas temperaturas testadas, 25°C e 40°C. De acordo com a teoria, o ideal é que o Módulo de Resiliência se mantenha estável com a variação das tensões, dentro de um limite elástico, variando com a temperatura do ensaio.

No que concerne à mistura de referência que passou pelo processo de envelhecimento, pode-se inferir que à temperatura de 25°C, com 10% da RT, obteve-se o melhor desempenho elástico. Com o aumento do percentual do esforço de Resistência à Tração, mantendo-se constante a temperatura, há redução nos valores do MR para 20% da RT, que aumenta quando a porcentagem passa a ser 30% da RT. Com o aumento da temperatura de 25°C para 40°C, observa-se a diminuição do desempenho elástico, em relação a 25°C para todas as porcentagens da RT. Os valores de MR a 40°C praticamente se mantém constante, percebe-se, pois, uma estabilidade com a variação das tensões, que pode ser observado na figura 42.

É possível notar que para as duas temperaturas, 25°C e 40°C e para diferentes tensões, (10%, 20%, 30%) da Resistência à Tração, o compósito de referência tem Módulo de Resiliência praticamente constante, concluindo-se que é pouco suscetível à variação de temperatura.

Figura 42: Gráfico do Módulo de Resiliência do CA da amostra de referência

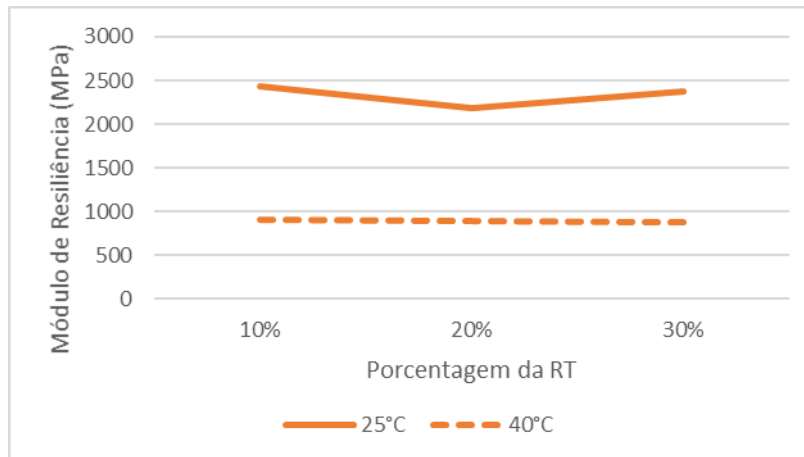
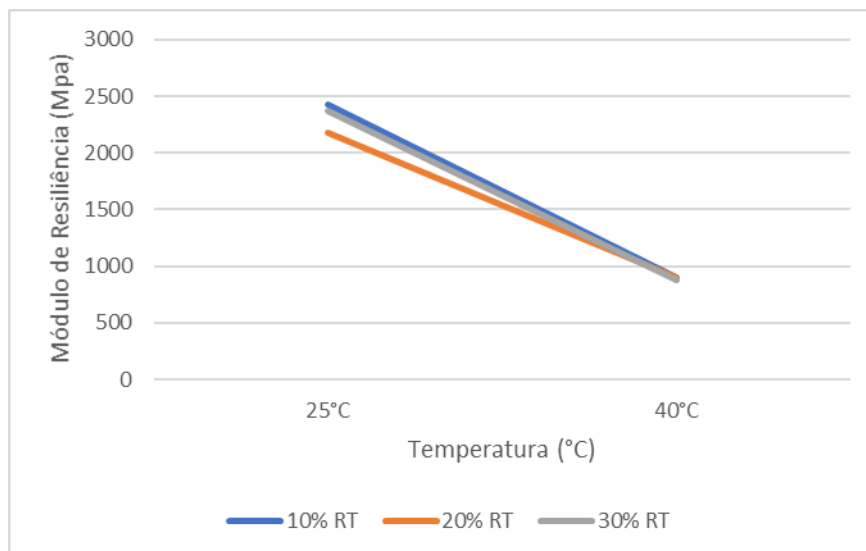


Figura 43: Módulo de Resiliência da amostra de referência (10% da RT, 20% da RT, 30% da RT)

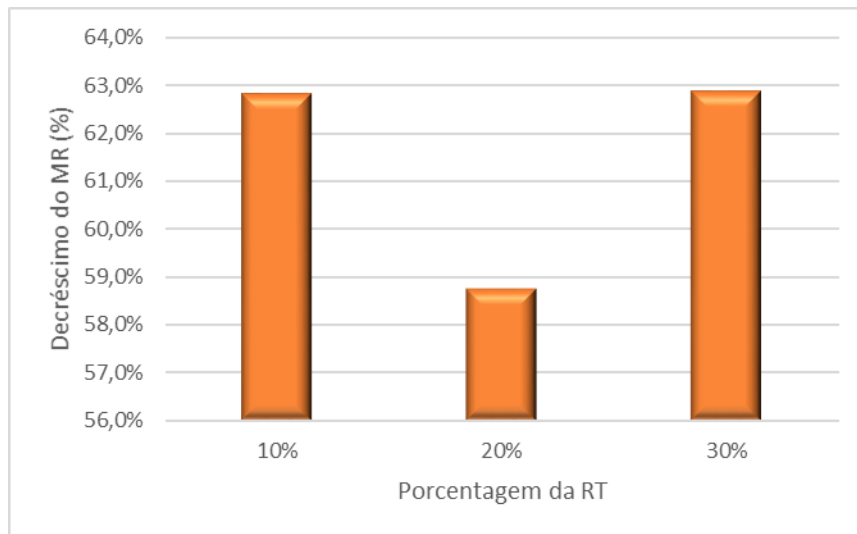


A redução do MR com o aumento da temperatura pode ser visualizada na figura 44 e na tabela 27, nos quais evidenciam as perdas nos valores de MR a 40°C, relativo aos valores obtidos do MR a 25°C. Nota-se que a maior perda da elasticidade do compósito asfáltico pode ser observada, quando o mesmo foi exposto a 30% do esforço de RT, sendo o menor valor referente a 20% de RT.

Tabela 27: Influência da temperatura no Módulo de Resiliência da amostra de referência

Mistura	Carga(%RT)	25°C→40°C
CA ASAC	10%RT	62,8%
	20%RT	58,7%
	30%RT	62,9%

Figura 44: Gráfico do Decréscimo do Módulo de Resiliência com a Temperatura da amostra de referência



No que se refere à mistura modificada por nanomaterial de grafeno, sob processo de envelhecimento, observa-se que à temperatura de 25°C, com 20% da RT, obteve-se o melhor desempenho elástico para essa mesma temperatura. Com o aumento 20% do percentual do esforço de Resistência à Tração, mantendo-se a temperatura, há diminuição nos valores do MR, que possui melhor comportamento quando a porcentagem passa a ser de 30% da RT. Com o aumento da temperatura de 25°C para 40°C, observa-se a diminuição do desempenho elástico, em relação a 25°C para todas as porcentagens da RT. Os valores de MR a 40°C praticamente se mantêm constante, percebe-se, pois, uma estabilidade com a variação das tensões, que pode ser observado na figura 45. É possível notar que para as duas temperaturas, 25°C e 40°C e para diferentes tensões, (10%, 20%, 30%) da Resistência à Tração, o compósito de referência tem Módulo de Resiliência praticamente constante, concluindo-se que é pouco suscetível à variação de temperatura.

Figura 45: Módulo de Resiliência do CA da amostra grafeno

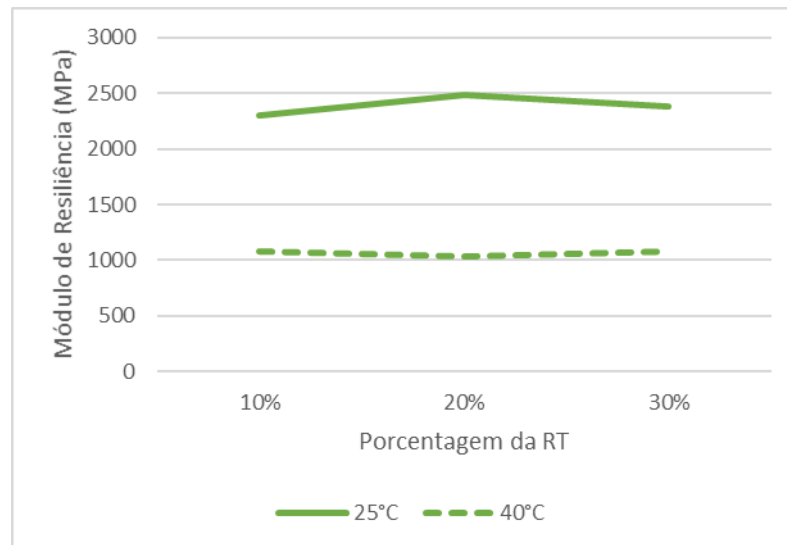
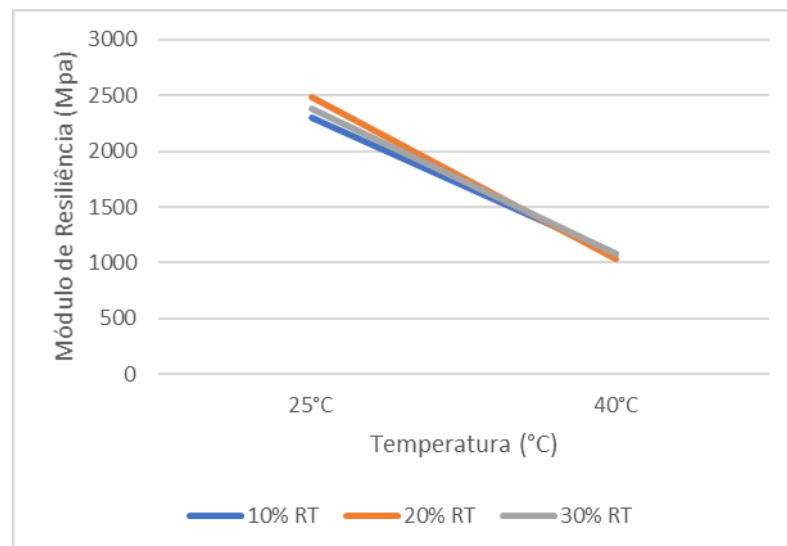


Figura 46: Gráfico do Módulo de Resiliência da amostra grafeno (10% da RT, 20% da RT, 30% da RT)



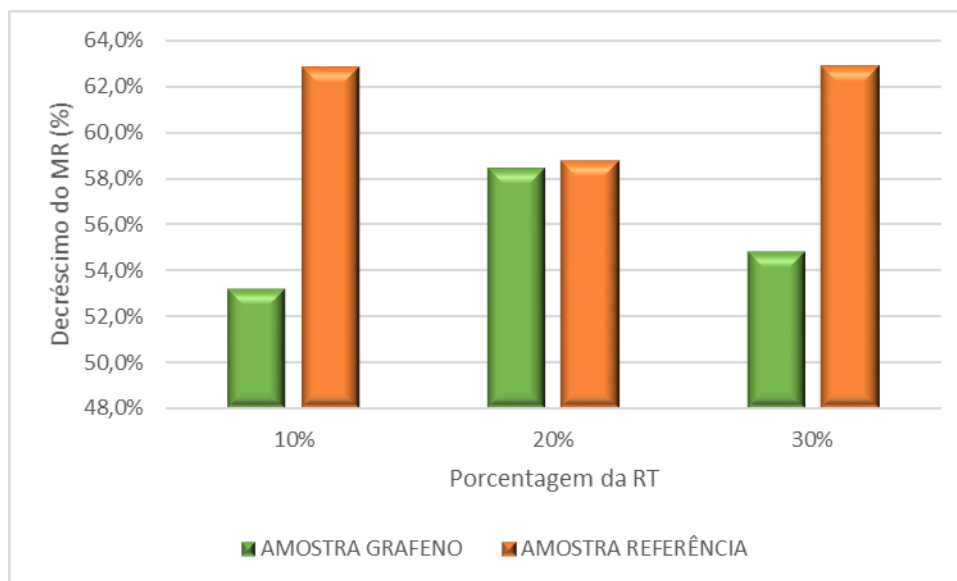
A redução do MR com o aumento da temperatura pode ser visualizada na figura 47 e na tabela 28, nos quais se observam as perdas nos valores de MR a 40°C, relativo aos valores obtidos do MR a 25°C. Nota-se que a maior perda da elasticidade do compósito asfáltico pode ser observada, quando o mesmo foi exposto a 20% do esforço de RT, sendo o menor valor referente a 10% de RT. Além

disso, é possível concluir que as perdas por temperatura para amostra grafeno são menores que nas de referência, através da visualização do figura 47.

Tabela 28: Influência da temperatura no Módulo de Resiliência da amostra grafeno

Mistura	Carga(%RT)	25°C→40°C
CA ASAC	10%RT	53,2%
	20%RT	58,4%
	30%RT	54,8%

Figura 47: Gráfico do Decréscimo do Módulo de Resiliência com a Temperatura da amostra referência e amostra grafeno.



Ao se comparar os resultados provenientes dos ensaios realizados, notados na figura 48, é possível perceber que para as duas temperaturas, 25°C e 40°C, o Módulo de Resiliência foi maior nas misturas modificadas pelo grafeno, nas porcentagens de 20% e 30% da RT, apenas para 10%RT, o MR da mistura modificada com grafeno foi menor, concluindo-se que esse nanomaterial confere maior desempenho mecânico aos compósitos que o empregam em sua composição.

Figura 48- Gráfico do Módulo de Resiliência da amostra de referência (10% da RT, 20% da RT, 30% da RT), e da amostra grafeno nas temperaturas de 25°C e 40°C



No que se refere a mistura não envelhecida a temperatura de 25°C com 10% da Resistência à Tração, obtém-se o melhor desempenho elástico para esse compósito. Com o aumento do percentual do esforço de Resistência à Tração, para essa mesma temperatura, há redução nos valores do Módulo de Resiliência. O aumento da temperatura de 25°C para 40°C, proporciona a diminuição do desempenho elástico, ao se comparar com a temperatura de 25°C para todas as porcentagens da RT. O destaque na temperatura de 40°C é para o esforço de 10% da RT, no qual se nota, o melhor resultado de MR, notando-se uma estabilidade com a variação das tensões, que pode ser observado na figura 49.

Nas temperaturas de 25°C e 40°C e para diferentes tensões, (10%, 20%, 30%) da Resistência à Tração, o compósito com ASAC como agregado graúdo, tem Módulo de Resiliência praticamente constante, o que denota que o compósito é pouco suscetível à variação de temperatura.

Figura 49: Gráfico do Módulo de Resiliência do CA da amostra não envelhecida

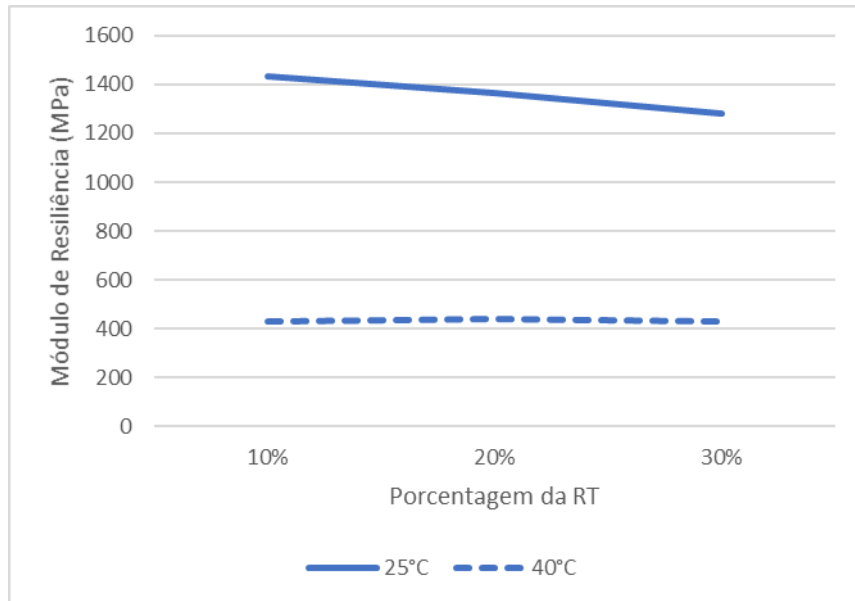
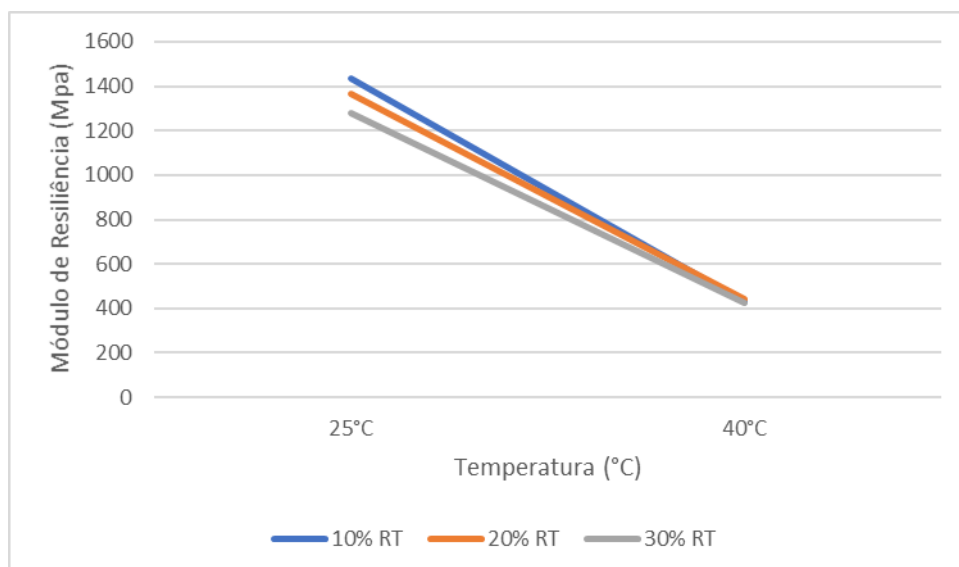


Figura 50: Gráfico do Módulo de Resiliência da amostra não envelhecida (10% da RT, 20% da RT, 30% da RT)



A redução do MR com o aumento da temperatura pode ser visualizada na figura 50 e na tabela 29, nos quais evidenciam as perdas nos valores de MR a 40°C, relativo aos valores obtidos do MR a 25°C. Nota-se que a maior perda da elasticidade do compósito asfáltico pode ser observada, quando o mesmo foi exposto a 10% do esforço de RT, sendo o menor valor referente a 30% de RT.



Tabela 29: Influência da temperatura no Módulo de Resiliência

Mistura	Carga(%RT)	25°C→40°C
CA ASAC	10%RT	70,15%
	20%RT	67,67%
	30%RT	66,67%

Figura 51: Gráfico do Decréscimo do Módulo de Resiliência com a Temperatura da amostra não envelhecida

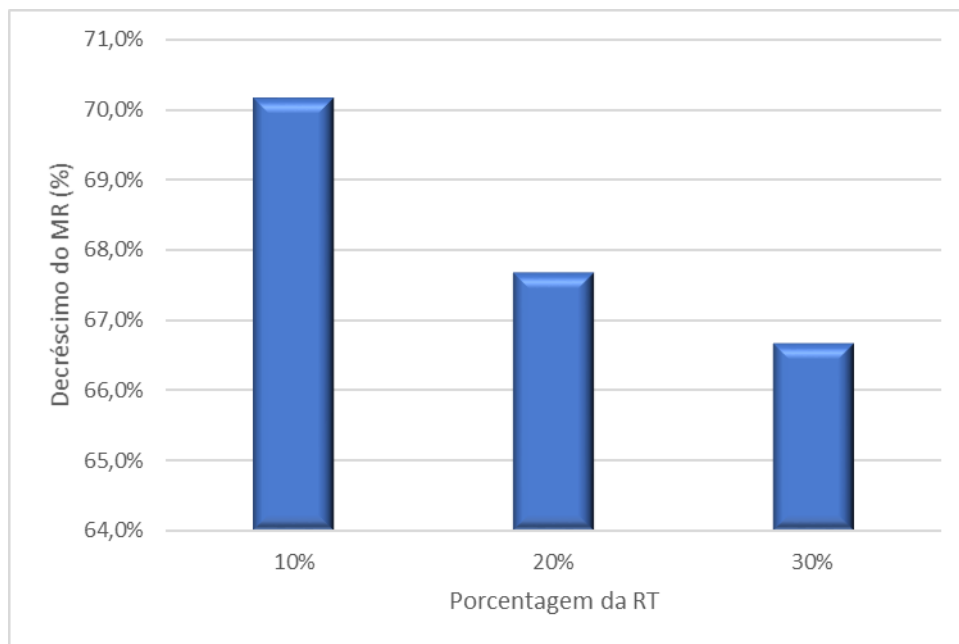
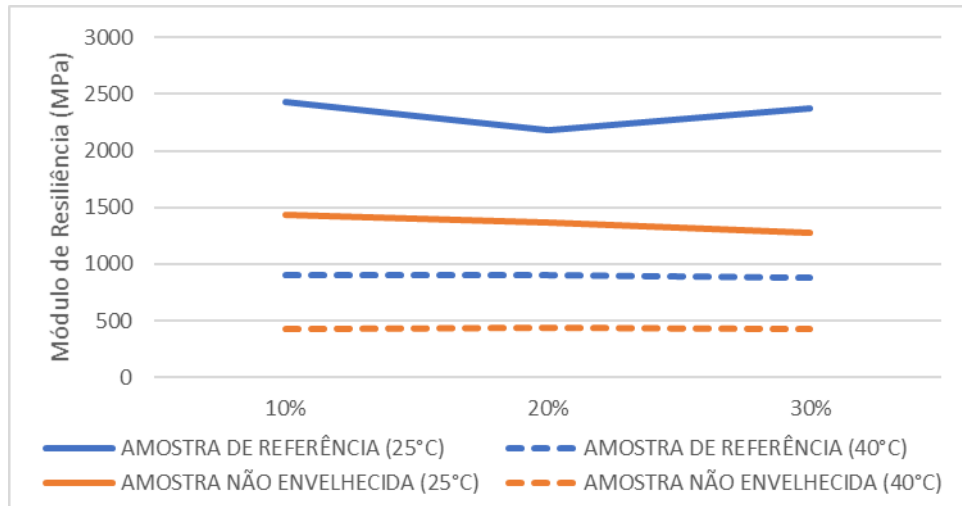
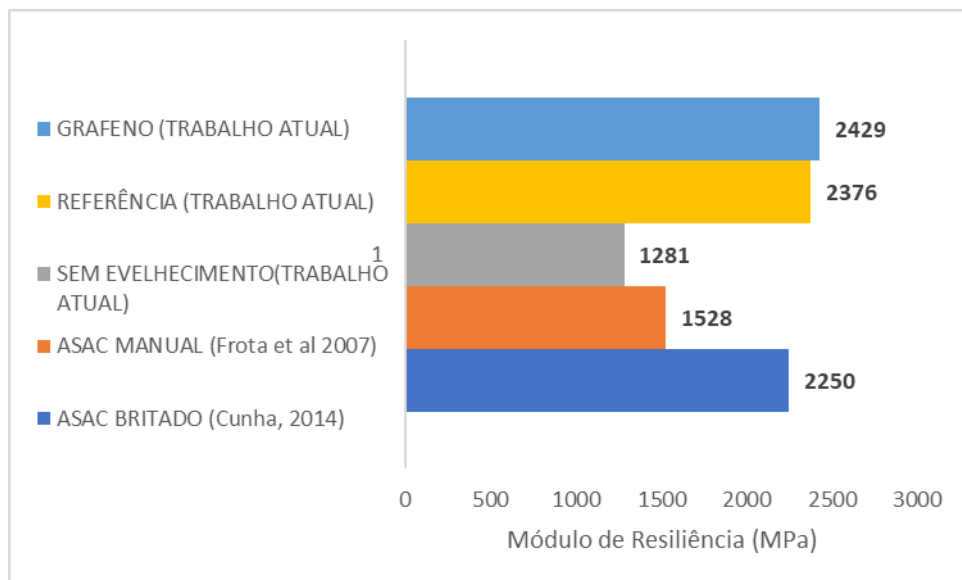


Figura 52: Gráfico do Módulo de Resiliência da amostra de referência (10% da RT, 20% da RT, 30% da RT), e da amostra não envelhecida nas temperaturas de 25°C e 40°C



Desse modo, em posse dos resultados da mistura não envelhecida e da de referência que passou pelo acondicionamento térmico referente ao envelhecimento, é possível ratificar a importância desse processo para o aumento da rigidez da mistura, que proporciona aumentos consideráveis no desempenho mecânico das mesmas.

Figura 53: Gráfico Comparativo de Módulo de Resiliência de Bibliografias Estudadas 30%RT



Através do gráfico da figura 53 é possível visualizar o quão positivo é o resultado referente ao ensaio de Módulo de Resiliência para as misturas modificadas pelo grafeno. Dentre as bibliografias estudadas, mostra-se com o valor superior as

demais misturas, estudadas por Cunha (2014) e Frota et al. (2007) que não empregaram grafeno na sua composição, demonstrando a importância desse nanomaterial no desempenho mecânico de um revestimento asfáltico.

## **5. CONCLUSÕES**

Ao presente trabalho coube a função de realizar a análise do comportamento mecânico das misturas asfálticas do tipo CA, com o emprego de ASAC como agregado graúdo, em substituição aos agregados convencionalmente utilizados na pavimentação asfáltica, como meio de resolver o problema de escassez de material pétreo, característica intrínseca da região Amazônica. Além do emprego de agregado graúdo alternativo na mistura, estudou-se os efeitos mecânicos provenientes da adição ao ligante asfáltico de 4% de nanomaterial de multicamadas de grafeno, proveniente da moagem de 4h do material grafite. Avaliou-se também a influência do processo de envelhecimento nos resultados mecânicos do revestimento asfáltico estudado.

Concernente a isso, a pesquisa realizada por meio de Revisão Bibliográfica, com diversos trabalhos sobre o tema presente na literatura, o Grupo de Pesquisa em Geotecnia, GEOTEC, tem procurado estudar de modo aprofundado o emprego do ASAC em misturas asfálticas, como meio de possibilitar a difusão e ampliação do conhecimento deste material, além de contribuir para sua utilização em larga escala, tal que seja comercialmente viável.

A seguir podem ser observadas as principais conclusões acerca da presente pesquisa:

A adição do nanomaterial grafeno às misturas asfálticas proporcionou incremento considerável nos valores de Resistência à Tração e Módulo de Resiliência em relação a mistura de referência.

Há uma forte influência da temperatura nos resultados dos ensaios mecânicos, tanto no que diz respeito ao Teste de Resistência à Tração, quanto ao de Módulo de Resiliência.

Também pode-se inferir que houve modificações no comportamento mecânico, no tocante ao Módulo de Resiliência, quando se variou o percentual do esforço de Resistência a Tração. Mas a principal mudança observada no MR é decorrente do processo de acondicionamento térmico por duas horas, que se refere ao envelhecimento da massa asfáltica, o qual proporciona aumento na rigidez do compósito, refletindo nos resultados que são superiores ao da mistura não envelhecida e da temperatura.

Quanto à Resistência à Tração por Compressão Diametral, a composição de referência e a amostra com multicamadas de grafeno atingiram valores superiores ao mínimo estabelecido em normas do DNIT. Apenas a amostra não envelhecida não atingiu esse mínimo. O que significa que pela precariedade de agregados graúdos da região, que as duas misturas supracitadas possuem viabilidade técnica, podem, pois, ser empregadas em rodovias e é possível a obtenção de bons resultados na prática.

No que se refere ao Módulo de Resiliência, nota-se que nas duas temperaturas, 25°C e 40°C nas diferentes tensões, (10%, 15%, 20%, 30%) da Resistência à Tração, para todos os tipos de mistura, de referência, com multicamadas de grafeno e não envelhecida, nas quais empregou-se na sua composição o ASAC como agregado graúdo, têm valores de Módulo de Resiliência praticamente constantes, concluindo-se que os compósitos são pouco suscetíveis à variação de temperatura, possuem, desse modo, grande resistência mecânica. Cabe destacar que a adição do grafeno às misturas asfálticas também aumentou o Módulo de Resiliência da amostra de referência.

Pelo mostrado, percebe-se que os ensaios de Resistência à Tração e de Módulo de Resiliência evidenciam desempenho satisfatório com o uso de ASAC nas misturas asfálticas como agregado graúdo nos compósitos estudados, o de referência, o com multicamadas de grafeno e o não envelhecido. Apenas para o caso da amostra que não passou pelo processo de acondicionamento térmico, o

valor de RT foi inferior ao determinado por norma, validando desse modo as duas outras amostras do ponto de vista técnico, notando-se que, o emprego desse agregado alternativo e do modificador de multicamadas de grafeno pode ser viável.

As pesquisas referentes à caracterização mecânica das misturas asfálticas empregando-se materiais alternativos é bastante abrangente e possui expectativa de uso na pavimentação asfáltica da região Amazônica. Com o intuito de aprimorar os resultados do trabalho, recomenda-se:

- a) Analisar o comportamento mecânico com a adição de outros tipos de nanomateriais ao ligante como polímeros, nanoargila, vidro.
- b) Executar trechos experimentais com o emprego do material alternativo ASAC para avaliar seu desempenho em campo.
- c) Realizar ensaios em um menor intervalo de temperatura e com temperaturas mais elevadas que as do trabalho, representando o clima típico da região.
- d) Implementação de materiais de enchimento proveniente de resíduos, como a cal de carbureto, a fim de avaliar a possível substituição do cimento Portland nas misturas estudadas;
- e) Realizar outros tipos de ensaios mecânicos para avaliar o desempenho da mistura modificada com multicamadas de grafeno como módulo dinâmico.

## APÊNDICE

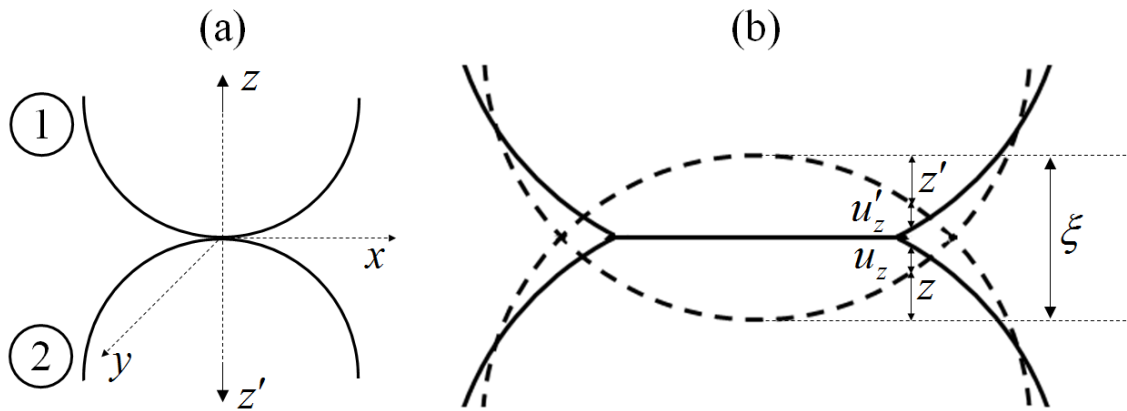
### DINÂMICA DAS PARTÍCULAS DO MOINHO DE BOLAS

Neste apêndice desenvolveremos a teoria da dinâmica do movimento das esferas no interior de um moinho de bolas de alta energia. Consideraremos que tanto o material do qual são constituídas as esferas, como o material do qual é constituído o cilindro são perfeitamente elásticos. Nos cálculos aqui desenvolvidos tomaremos como referência o livro de L. D. Landau e E. M. Lifshitz, intitulado "Theory of Elasticity, publicado pela Pergamon Press.

Na figura (1) apresentamos duas superfícies esféricas em contato uma com a outra. Na figura (1a), as esferas encontram-se em contato normal, sem que estejam submetidas a qualquer força. Na figura 1b as duas superfícies encontram-se submetidas a uma determinada força, de maneira que as mesmas se encontram deformadas.

Figura 1: Duas esferas em contato entre si. Em a) estão em contato, sem nenhuma pressão de uma sobre a outra. Em b) as esferas estão pressionadas uma sobre a outra, de forma que sofrem uma deformação total  $\xi$ , em que as linhas pontilhadas

representam as esferas sem deformação, e as linhas cheias, as esferas comprimidas.



Definimos o eixo  $z$  perpendicular à superfície de contato dos dois corpos, superfície essa que se encontra, no plano  $xy$ , com o sentido positivo para dentro de cada corpo. Ou seja, em direções opostas um ao outro.

A partir de agora vamos usar a notação indicial, de maneira que

$$x_1 = x \text{ e } x_2 = y \quad (1)$$

Nessa notação, a superfície genérica de segundo grau do corpo 1 pode ser escrita como

$$z = \sum_{\alpha, \beta} \kappa_{\alpha, \beta} x_{\alpha} x_{\beta}, \quad (2)$$

onde  $\alpha$  e  $\beta$  podem assumir os valores 1 e 2, e  $\kappa_{\alpha\beta}$  representa um tensor simétrico de rank 2.

Na forma expandida mais usualmente conhecida, a equação (2) pode ser escrita na como:

$$z = \kappa_{11} x_1 x_1 + \kappa_{12} x_1 x_2 + \kappa_{21} x_2 x_1 + \kappa_{22} x_2 x_2$$

Considerando que  $\kappa_{12} = \kappa_{21}$  (simétrico), da equação (1), transformando de notação inicial para a rotação em  $x$  e  $y$ , escrevemos:

$$z = \kappa_{11} x^2 + 2\kappa_{12} xy + \kappa_{22} y^2, \quad (3)$$

onde  $\kappa_{11}$ ,  $\kappa_{12}$  e  $\kappa_{22}$  são constantes. A equação (3) seria a forma geral da superfície formada pela interseção do corpo 1 por um plano paralelo ao plano  $xy$ .

Para ilustrar o que foi dito acima, vamos considerar que o corpo 1 seja uma esfera de raio  $R$ , como mostra a figura 2.

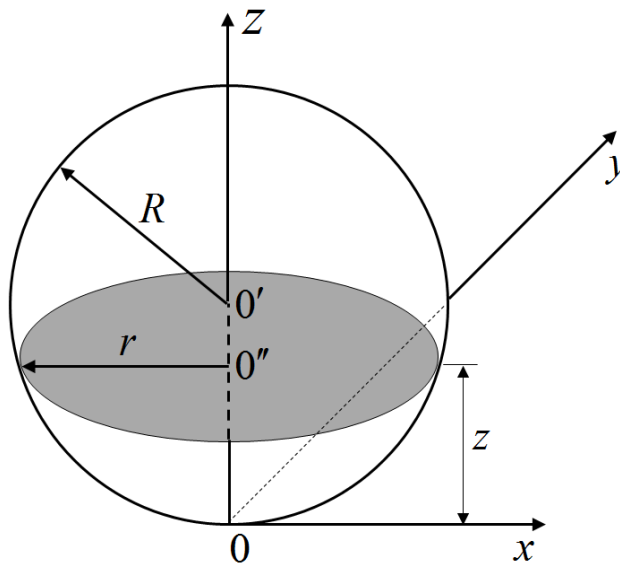
A equação da esfera com centro no ponto  $(0,0,R)$  é dada por:

$$x^2 + y^2 + (z - R)^2 = R^2$$

Tomando o valor fixo de  $z$ , a equação acima fica:

$$x^2 + y^2 = (2R - z)z. \quad (4)$$

Figura 2: Esfera de raio  $R$  com uma seção de calota (área sombreada) de raio  $r$ , onde  $O$  é a origem do sistema de coordenadas,  $O'$  é o centro da esfera, e  $O''$  é o centro da interseção da esfera com o plano  $z^{\wedge}$ , isto é, o plano paralelo ao plano  $xy$ , a uma altura  $z$  desse plano.



A equação (4) descreve um círculo no plano  $xy$  com raio  $r$  dado por:

$$r = \sqrt{(2R - z)z}.$$

Voltemos agora à notação indicial. Em analogia com a equação (2) para o corpo 2, podemos escrever



$$z' = \sum_{\alpha\beta} \kappa'_{\alpha\beta} x_{\alpha} x_{\beta}. \quad (5)$$

Tanto a equação (2) como a equação (5), representam as superfícies em contato normal, sem nenhuma força agindo sobre elas. Agora vamos considerar que os dois corpos estão comprimidos um contra o outro. Nesse caso, a superfície de contato ficará achatada, com a deformação total  $\xi$ . Conforme a figura 1(b), essa deformação é descrita como

$$\xi = (z + u_z) + (z' + u'_z) \quad (6)$$

Substituindo na equação (6) os valores de  $z$  e  $z'$  dadas pelas equações 2 e 5, respectivamente,

$$\xi = \sum_{\alpha\beta} (\kappa_{\alpha\beta} + \kappa'_{\alpha\beta}) x_{\alpha} x_{\beta} + u_z + u'_z. \quad (7)$$

Vamos escolher os eixos  $x$  e  $y$  de maneira que eles coincidam com os eixos principais do tensor  $\kappa_{\alpha\beta} + \kappa'_{\alpha\beta}$ . Chamando de  $A$  e  $B$  os valores principais daquele tensor, a equação (7) passa a ser escrita como

$$\xi = Ax^2 + By^2 + u_z + u'_z. \quad (8)$$

Vamos definir como  $R_1$  e  $R_2$  os raios de curvatura do corpo 1 no ponto de contato nos planos  $xy$  e  $yz$ , respectivamente. Da mesma forma, definimos os raios de curvatura  $R'_1$  e  $R'_2$  do corpo 2. Pode-se mostrar as seguintes relações entre as cortantes  $A$  e  $B$  e os raios de curvatura:

$$A + B = \frac{1}{2R_1} + \frac{1}{2R_2} + \frac{1}{2R'_1} + \frac{1}{2R'_2} \quad (9)$$

$$(A - B)^2 = \left( \frac{1}{2R_1} - \frac{1}{2R_2} \right)^2 + \left( \frac{1}{2R'_1} - \frac{1}{2R'_2} \right)^2 + 2 \cos(2\phi) \left( \frac{1}{2R_1} - \frac{1}{2R_2} \right) \left( \frac{1}{2R'_1} - \frac{1}{2R'_2} \right), \quad (10)$$

em que  $\phi$  é o ângulo entre as reações transversais definidas pelos raios de curvatura  $R'_1$  e  $R'_2$ . O raio de curvatura é tomado como positivo se o centro de curvatura se encontram dentro do corpo considerado, e negativo em caso contrário.

Consideremos que a superfície de contato entre os dois corpos seja plana e que sobre essa superfície existe uma distribuição de pressão  $P'(x', y')$ . O deslocamento no ponto  $(x, y)$  nas superfícies 1 e 2 são dados por

$$u_z(x, y) = \text{deslocamento no ponto } (x, y) \text{ da superfície 1}$$

$$u'_z(x, y) = \text{deslocamento no ponto } (x, y) \text{ da superfície 2.}$$

Usando as equações (9.5) da referência (Landau et al),  $u_z(x, y)$  e  $u'_z(x, y)$  são escritos como:

$$u_z = \frac{1-\sigma^2}{\pi Y} \iint \frac{P_z(x', y')}{r} dx' dy' \quad (11)$$

$$u'_z = \frac{1-\sigma'^2}{\pi Y'} \iint \frac{P_z(x', y')}{r} dx' dy', \quad (12)$$

onde  $r$  é a distância entre os pontos  $(x, y)$  e  $(x', y')$ ,

$$r = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}, \quad (13)$$

$Y$  é o módulo de elasticidade (Young) e  $\sigma$  o coeficiente de Poisson. Dividindo a equação (11) pela equação (12), encontramos:

$$\frac{u_z}{u'_z} = \frac{1-\sigma^2}{1-\sigma'^2} \frac{Y'}{Y}. \quad (14)$$

As equações (8) e (14) determinam os deslocamentos  $u_z$  e  $u'_z$  em qualquer ponto  $(x, y)$ .

Substituindo as equações (11) e (12) na equação (8), obtemos:

$$\frac{1}{\pi} \left( \frac{1-\sigma^2}{Y} + \frac{1-\sigma'^2}{Y'} \right) \iint \frac{P_z(x', y')}{r} dx' dy' = \xi - Ax^2 - Bx^2. \quad (15)$$

A solução da equação integral (15) determina a distribuição de pressão  $P_z(x, y)$  na superfície de contato dos dois corpos. A integral que aparece na equação (15) é muito comum na teoria do potencial, na qual ela nos dá o potencial devido à distribuição de uma carga elétrica, por exemplo:

$$V(x, y) = \int \frac{\rho(x', y')}{r} dx' dy',$$

onde  $\rho(x', y')$  é a densidade superficial de carga e  $V(x, y)$  o correspondente potencial.

Observemos que da equação (9) o resultado da integral dá uma dependência quadrática em  $x$  e  $y$ . Para fazer uma analogia com a teoria do potencial, sabe-se que o potencial de uma distribuição uniforme de carga  $\rho$  dentro de um elipsóide também tem a forma quadrática em  $x$  e  $y$ . Assim, para o elipsóide:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1, \quad (16)$$

uniformemente carregado com uma distribuição volumétrica de carga  $\rho$ , sabe-se que o potencial  $\phi(x, y, z)$  dentro do elipsóide é dado por :

$$\phi(x, y, z) = \pi\rho abc \int_0^\infty \left\{ 1 - \frac{x^2}{a^2 + \eta} - \frac{y^2}{b^2 + \eta} - \frac{z^2}{c^2 + \eta} \right\} \frac{d\eta}{\sqrt{(a^2 + \eta)(b^2 + \eta)(c^2 + \eta)}}, \quad (17)$$

onde  $\eta$  é uma variável da integração. Como estamos interessados na integral do tipo da equação (15), associada com a superfície de contato dos dois corpos, portanto bidimensional, vamos transformar a equação (17) para duas dimensões. Para isso, vamos achatar o elipsóide na direção  $z$ , fazendo  $c \rightarrow 0$  e  $z \rightarrow 0$  na equação (17). Assim, temos,

$$\phi(x, y) = \pi\rho abc \int_0^\infty \left\{ 1 - \frac{x^2}{a^2 + \eta} - \frac{y^2}{b^2 + \eta} \right\} \frac{d\eta}{\sqrt{(a^2 + \eta)(b^2 + \eta)}} \quad (18)$$

Por outro lado, também podemos escrever o potencial  $\phi(x, y, z)$  como:

$$\phi(x, y, z) = \iiint \frac{\rho(x', y', z')}{r} dx' dy' dz',$$

ou

$$\phi(x, y, z) = \iiint \frac{\rho(x', y', z')}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}} dx' dy' dz',$$

onde

$$r = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}.$$

No limite de  $c \rightarrow 0$  e  $z$  e  $z' \rightarrow 0$ , integrando a equação acima nos limites

$$\pm \sqrt{1 - \frac{x'^2}{a^2} - \frac{y'^2}{b^2}},$$

obtido da equação (16), o potencial  $\phi(x, y)$  tem a forma:

$$\phi(x, y) = 2\rho c \iint \frac{dx' dy'}{r} \sqrt{1 - \frac{x'^2}{a^2} - \frac{y'^2}{b^2}}. \quad (19)$$

Comparando as equações (18) e (19), encontramos

$$\iint \frac{dx' dy'}{r} \sqrt{1 - \frac{x'^2}{a^2} - \frac{y'^2}{b^2}} = \frac{\pi ab}{2} \int_0^\infty \left\{ 1 - \frac{x^2}{a^2 + \eta} - \frac{y^2}{b^2 + \eta} \right\} \frac{d\eta}{\sqrt{(a^2 + \eta)(b^2 + \eta)}}. \quad (20)$$

Vamos agora ao ponto central do nosso cálculo. Compararemos a equação (20) com a equação (15). Obteremos que o lado direito da equação (20) a integral é na variável  $\eta$ . Portanto, o resultado tem dependência em  $x^2$  e em  $y^2$ , tal que acontece com o lado direito da equação (15). Por outro lado, o lado esquerdo da equação (20) tem a mesma forma de integral do lado esquerdo da equação (15). Daí, pode-se concluir que  $P(x, y)$  é proporcional a

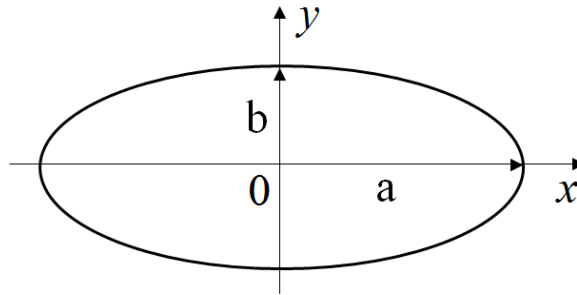
$$\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}}$$

ou seja,

$$P(x, y) = C \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}}, \quad (21)$$

onde  $C$  é uma constante a ser determinada e  $a$  e  $b$  são semi-eixos principal e da elipse. Em resumo, a área de contato entre dois corpos está circunscrita a uma elipse de semi-eixos principais  $a$  e  $b$ , mostrada na figura 3, sobre a qual age uma distribuição de pressão dada pela equação 21.

Figura 3: Forma da área de contato entre dois corpos.



Para determinar a constante  $C$ , vamos considerar que a força total agindo na superfície de contato entre os dois corpos é  $F$ . Assim, podemos escrever:

$$F = \iint P(x, y) dx dy, \quad (22)$$

onde a integral dupla é calculada em toda a superfície de contato.

Substituindo a equação (21) na equação (22), encontramos:

$$F = C \int_{-b}^b \int_{-a}^a \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}} dx dy,$$

de onde se tira que

$$C = \frac{3F}{2\pi ab}. \quad (23)$$

Assim a equação (21) passa a ser escrita como

$$P(x, y) = \frac{3F}{2\pi ab} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}}. \quad (24)$$

Substituindo a equação (24) na equação (15), temos:

$$\frac{1}{\pi} \left( \frac{1-\sigma^2}{Y} + \frac{1-\sigma'^2}{Y'} \right) \frac{3F}{2\pi ab} \iint \frac{dx' dy'}{r} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}} = \xi - Ax^2 - By^2. \quad (25)$$

Agora substituindo a integral dupla do lado esquerdo da equação (25) pelo lado direito da equação (20), escrevemos,

$$\begin{aligned} \frac{3F}{4\pi} \left( \frac{1-\sigma^2}{Y} + \frac{1-\sigma'^2}{Y'} \right) \int_0^\infty \left\{ 1 - \frac{x^2}{a^2 + \eta} - \frac{y^2}{b^2 + \eta} \right\} \frac{d\eta}{\sqrt{(a^2 + \eta)(b^2 + \eta)}} \\ = \xi - Ax^2 - By^2. \end{aligned} \quad (26)$$

Vamos definir como  $Y_{ef}$  com a seguinte expressão:

$$\frac{1}{Y_{ef}} = \left( \frac{1-\sigma^2}{Y} + \frac{1-\sigma'^2}{Y'} \right). \quad (27)$$

Comparando os dois lados da equação (26) termo a termo, obtemos

$$\frac{3F}{4\pi} \left( \frac{1-\sigma^2}{Y} + \frac{1-\sigma'^2}{Y'} \right) \int_0^\infty \left\{ 1 - \frac{x^2}{a^2 + \eta} - \frac{y^2}{b^2 + \eta} \right\} \frac{d\eta}{\sqrt{(a^2 + \eta)(b^2 + \eta)}} = \xi - Ax^2 - By^2,$$

onde

$$\xi = \frac{F}{\pi Y_{ef}} \int_0^\infty \frac{d\eta}{\left[ (a^2 + \eta)(b^2 + \eta)\eta \right]^{1/2}} \quad (28)$$

$$A = \frac{F}{\pi Y_{ef}} \int_0^\infty \frac{d\eta}{(a^2 + \eta) \left[ (a^2 + \eta)(b^2 + \eta)\eta \right]^{1/2}} \quad (29)$$

$$B = \frac{F}{\pi Y_{ef}} \int_0^\infty \frac{d\eta}{(b^2 + \eta) \left[ (a^2 + \eta)(b^2 + \eta)\eta \right]^{1/2}} \quad (30)$$

Podemos reescrever as equações (28)-(30) em termos de variáveis mais apropriadas para a utilização na integração numérica. Depois de alguma álgebra, podemos escrever:

$$\xi = \frac{2F}{\pi a Y_{ef}} \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\left[ 1 - e^2 \sin^2 \theta \right]^{1/2}} \quad (31)$$

$$Aa^2 = \frac{2F}{\pi Y_{ef}} \int_0^{\pi/2} \frac{\sin^2 \theta d\theta}{[1 - e^2 \sin^2 \theta]^{1/2}} \quad (32)$$

$$Ba^2 = \frac{2F}{\pi Y_{ef}} \int_0^{\pi/2} \frac{\sin^2 \theta d\theta}{[1 - e^2 \sin^2 \theta]^{3/2}}, \quad (33)$$

onde  $e$  é a excentricidade da elipse dada por:

$$e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}. \quad (34)$$

Agora vamos aplicar as equações (31)-(34) e (9)-(10) a duas situações que nos interessam para o processo de simulação: 1) Duas esferas em contato entre si; 2) Uma esfera em contato com a parede interna de um cilindro.

### A.1 Duas esferas em contato

Consideremos duas esferas de raios  $R$  e  $R'$  em contato entre si. Observamos as equações (9) e (10). Nesse caso, tomamos para  $R_1, R_2, R'_1, R'_2$  e  $\phi$  os seguintes parâmetros:

$$\begin{aligned} R_1 &= R_2 = R \\ R'_1 &= R'_2 = R' \\ \phi &= 90^\circ. \end{aligned}$$

Assim, das equações (9) e (10), temos:

$$\begin{aligned} A + B &= \frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \\ A &= B, \end{aligned}$$

de onde encontramos que

$$A = B = \frac{1}{2R} + \frac{1}{2R'}. \quad (35)$$

Como  $A = B$ , das equações (29) e (30) podemos concluir que  $a = b$ . Portanto, a área de contato entre os dois corpos é constituída por um círculo de raio  $a$ . Vamos

determinar o valor de  $a$ . Da equação (34) obteremos que  $e = 0$ . Usando as equações (31) e (35), com  $e = 0$ , escrevemos:

$$\left( \frac{1}{2R} + \frac{1}{2R'} \right) a^3 = \frac{2F}{\pi Y_{ef}} \int_0^{\pi/2} \sin^2 \theta d\theta.$$

Como  $\int_0^{\pi/2} \sin^2 \theta d\theta = \frac{\pi}{4}$ , então

$$\left( \frac{1}{2R} + \frac{1}{2R'} \right) a^3 = \frac{F}{Y_{ef}}$$

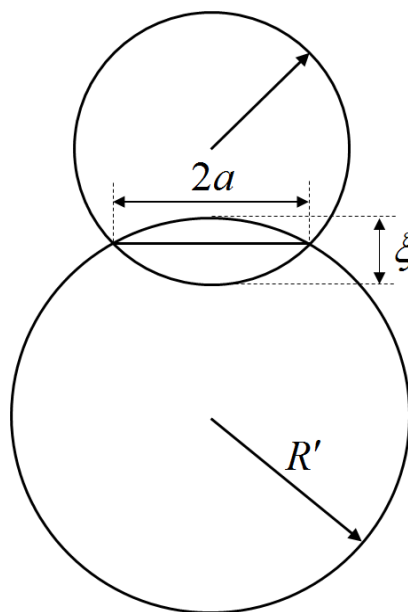
Definindo o raio efetivo  $R_{ef}$  como

$$\frac{1}{R_{ef}} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R'},$$

o raio  $a$  do círculo da superfície de contato entre as duas esferas, em função da força de compressão entre elas, é:

$$a = F^{1/3} \left( \frac{R_{ef}}{Y_{ef}} \right)^{1/3}. \quad (36)$$

Figura 4: Duas esferas em contato entre si. A área de contato é um círculo de raio  $a$ .





Da equação (36) observa-se que quanto maior o módulo de Young efetivo, menor a área de contato entre as duas esferas, e quanto maior a força  $F$ , ou o raio efetivo  $R_{ef}$ , maior a área de contato.

Da equação (31) tiramos:

$$\xi = \frac{2F}{\pi a Y_{ef}} \int_0^{\pi/2} d\theta = \frac{F}{a Y_{ef}}.$$

Como o raio  $a$  da superfície de contato é conhecido, dado pela equação (36), a equação acima fica:

$$\xi = \left( \frac{1}{Y_{ef}^2 R_{ef}} \right)^{1/3} F^{2/3}. \quad (37)$$

Escrevendo a força  $F$  em função de  $\xi$ , temos:

$$F = Y_{ef} \sqrt{R_{ef}} \xi^{3/2}. \quad (38)$$

A energia potencial  $U$  das esferas em contato entre si pode ser obtida da relação:

$$\begin{aligned} -F &= -\frac{\partial U}{\partial \xi} \\ dU &= \int F d\xi \\ U &= \int (Y_e^2 R_{ef})^{1/2} \xi^{3/2} d\xi \\ U &= \frac{2}{5} (Y_e^2 R_{ef})^{1/2} \xi^{5/2} + \text{constante.} \end{aligned}$$

Como, quando  $\xi = 0$  implica que  $U = 0$ , concluímos que a constante = 0. Logo, a energia potencial das esferas em contato é

$$U = \frac{2}{5} (Y_e^2 R_{ef})^{1/2} \xi^{5/2}. \quad (39)$$

Agora vamos determinar a força máxima de contato em função da velocidade de aproximação das esferas, que chamamos de  $v$ . Observemos que, antes do impacto, a energia mecânica das duas esferas é constituída apenas pela soma de

suas energias cinéticas. Tomando como referência o centro de massa das duas partículas, a energia cinética total, imediatamente antes do choque, é:

$$E_{ci} = \frac{1}{2} \mu v^2, \quad (40)$$

onde  $\mu$  é a massa efetiva das duas esferas, dada por

$$\mu = \frac{1}{m} + \frac{1}{m'}, \quad (41)$$

e  $v$  é o módulo da velocidade relativa de uma esfera em relação a outra. Ou seja,  $v$  é a velocidade com que as esferas estão se aproximando, imediatamente antes do choque. Após o choque, as esferas permanecem em contato por um certo intervalo de tempo. Neste intervalo de tempo, elas se aproximam com a velocidade  $v = \partial \xi / \partial t$ , com energia cinética total:

$$E_{cf} = \frac{1}{2} \mu \left( \frac{d\xi}{dt} \right)^2. \quad (42)$$

Da conservação da energia mecânica, a energia total antes do choque é igual à energia total depois do choque. Antes do choque, a energia total era constituída apenas pela cinética, dada pela equação (40). Após o choque, a energia mecânica é a soma da cinética, dada pela equação (42), mais a energia potencial, dada pela equação (39). Assim escrevemos:

$$E_{cf} + U = E_{ci}$$

$$\frac{1}{2} \mu \left( \frac{d\xi}{dt} \right)^2 + \frac{2}{5} (Y_e^2 R_{ef})^{1/2} \xi^{5/2} = E_{ci}. \quad (43)$$

Da equação (38) sabemos que a força máxima entre as esferas ocorre quando a deformação  $\xi$  é máxima ( $\xi_{\max}$ ). Quando isso ocorre, a velocidade relativa das esferas é zero ( $d\xi/dt = 0$ ). Assim, inserindo essas informações na equação (43), temos:

$$\xi_{\max} = \left[ \frac{5}{4} \frac{\mu}{Y_{ef} \sqrt{R_{ef}}} v^2 \right]^{2/5}. \quad (44)$$

Substituindo (44) em (38), vem:

$$F_{\max} = \left( Y_{ef} \sqrt{R_{ef}} \right)^{2/5} \left( \frac{5}{4} \mu v^2 \right)^{3/5}. \quad (45)$$

A distribuição da pressão na superfície de contato é dada pela equação (24). Para uma certa força  $F$ , ela é máxima no centro da interface em  $x=0$  e  $y=0$ :

$$P(0,0) = \frac{3}{2} \frac{F}{\pi ab}.$$

Como a interface de duas esferas é circular,  $a = b$ ,

$$P(0,0) = \frac{3}{2} \frac{F}{\pi a^2}.$$

da equação (36), obtemos

$$a = F^{1/3} \left( \frac{R_{ef}}{Y_{ef}} \right)^{1/3}.$$

Substituindo o raio  $a$  descrito na equação acima, em  $P(0,0)$ , encontramos

$$P(0,0) = \frac{3F^{1/3}}{2\pi} \left( \frac{Y_{ef}}{R_{ef}} \right)^{2/3}.$$

Substituindo a equação (38), para a força  $F$ , na equação anterior, encontramos:

$$P(0,0) = \frac{3}{2\pi} \frac{Y_{ef}}{\sqrt{R_{ef}}} \xi^{1/2}.$$

Da equação acima observamos que a pressão será máxima no centro da interface de contato quando a deformação  $\xi$  for máxima. Assim:

$$P(0,0) = \frac{3}{2\pi} \frac{Y_{ef}}{\sqrt{R_{ef}}} \xi_{\max}^{1/2}.$$

Usando  $\xi_{\max}$  dado pela equação 44, obtemos, finalmente, que a pressão máxima no centro da área de contato entre duas esferas é:

$$P_{\max}(0,0) = \frac{15}{8\pi} \left( \frac{Y_{ef}^4}{R_{ef}^3} \mu v^2 \right)^{1/5}. \quad (46)$$

## A.2 Esfera em contato com a parede interna de um cilindro

Vamos tratar do contato interno de uma esfera com um cilindro oco, isto é, com a esfera localizada no interior do cilindro, como mostra a figura 5. No ponto de contato, os raios de curvatura da esfera nos plano  $xz$  e  $yz$  são ambos  $R$ , ou seja,

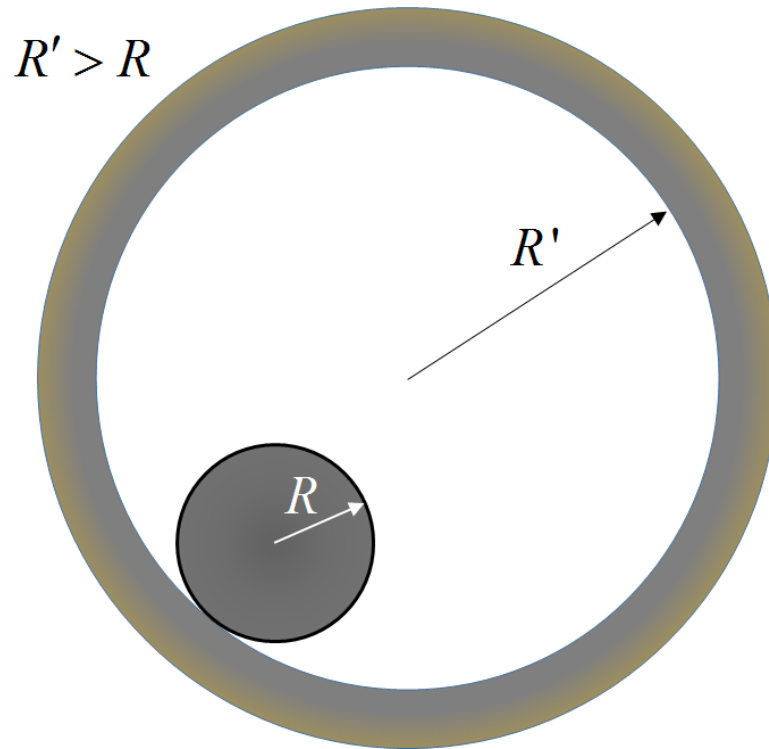
$$R_1 = R_2 = R. \quad (47)$$

Naquele mesmo ponto, o raio de curvatura do cilindro no plano  $yz$  é  $-R'$  e no plano  $xz$  é infinito,

$$R'_1 = -R' \text{ e } R'_2 = \infty, \quad (48)$$

onde o sinal negativo de  $R'_1$  vem da concavidade da superfície cilíndrica, ou seja, o centro da curvatura encontra-se fora do corpo cilíndrico, representado na figura 5 pela região escura.

Figura 5: Uma esfera de raio  $R$  em contato interno com um cilindro oco de raio  $R'$ .



Como o ângulo  $\phi$  entre os planos  $xz$  e  $yz$  é  $90^\circ$  ( $\phi = 90^\circ$ ), das equações (9), (10), (47) e (48), obtemos,

$$A + B = \frac{1}{R} - \frac{1}{2R'} \quad (49)$$

e

$$A - B = -\frac{1}{2R'}. \quad (50)$$

Das equações 49 e 50, tiramos

$$A = \frac{1}{2R} - \frac{1}{2R'} \quad (51)$$

$$B = \frac{1}{2R}. \quad (52)$$

A seguir vamos usar as equações 31-34. Para determinarmos  $\xi$  da equação (31) para uma dada força  $F$  e um dado módulo de Young efetivo  $Y_{ef}$ , precisamos determinar os valores de  $a$  (semi-eixo de elipse que constitui a área de contato) e  $e$

(excentricidade da elipse). Por outro lado, conhecemos  $A$  e  $B$ , que dependem apenas dos raios de curvatura, que são dados pelas equações (51) e (52).

Dividindo a equação (32) pela equação (33), encontramos:

$$\frac{A}{B} = \frac{\int_0^{\pi/2} \frac{\text{sen}^2 \theta d\theta}{[1 - e^2 \text{sen}^2 \theta]^{1/2}}}{\int_0^{\pi/2} \frac{\text{sen}^2 \theta d\theta}{[1 - e^2 \text{sen}^2 \theta]^{3/2}}}. \quad (53)$$

Como conhecemos a razão  $A/B$  em função dos raios da esfera do cilindro, determinamos autoconsistentemente o correspondente valor da excentricidade  $e$ . A partir do valor conhecido de  $e$ , da equação (32) obtemos o valor de  $a$ . Com os valores de  $e$  e  $a$  conhecidos, determinamos o valor de  $\xi$  a partir da equação (31). Para realizarmos os cálculos autoconsistentemente, devemos elaborar um programa computacional. Para prosseguir, vamos definir:

$$G_1 = \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{[1 - e^2 \text{sen}^2 \theta]^{1/2}} \quad (54)$$

e

$$G_2 = \int_0^{\pi/2} \frac{\text{sen}^2 \theta d\theta}{[1 - e^2 \text{sen}^2 \theta]^{1/2}}. \quad (55)$$

Em termos de  $G_1$  e  $G_2$  as equações (31) e (32) ficam:

$$\xi = \frac{2F}{\pi a Y_{ef}} G_1 \quad (56)$$

$$Aa^3 = \frac{2F}{\pi Y_{ef}} G_2. \quad (57)$$

Da equação (57), tiramos:

$$a = \left( \frac{2F}{\pi A Y_{ef}} G_2 \right)^{1/3}.$$

Como

$$A = \frac{1}{2R} - \frac{1}{2R'} \equiv \frac{1}{2} \frac{1}{R_r},$$

onde

$$\frac{1}{R_r} = \frac{1}{R} - \frac{1}{R'}, \quad (58)$$

então,

$$a = \left( \frac{4FR_r}{\pi Y_{ef}} G_2 \right)^{1/3}. \quad (59)$$

Substituindo (59) em (56), vem

$$\xi = \left( \frac{2G_1^3}{\pi^2 R_r G_2 Y_{ef}^2} \right) F^{2/3} \quad (60)$$

e

$$F = \pi \sqrt{\frac{R_r}{2}} \left( \frac{G_2}{G_1^3} \right)^{1/2} Y_{ef} \xi^{3/2}. \quad (61)$$

Seguindo os mesmos passos para o cálculo de energia potencial no caso de duas esferas, a energia potencial devido ao contato de uma esfera com a superfície interna de um cilindro é dada por:

$$U = \frac{2\pi}{5} \sqrt{\frac{R_r}{2}} \left( \frac{G_2}{G_1^3} \right)^{1/2} Y_{ef} \xi^{5/2}. \quad (62)$$

Da conservação da energia mecânica, tiramos

$$\xi_{\max} = \left[ \frac{5}{4\pi} \sqrt{\frac{2}{R_r}} \left( \frac{G_1^3}{G_2} \right)^{1/2} \frac{\mu}{Y_{ef}} \right]^{2/5} v^{4/5}, \quad (63)$$

onde  $\mu$  é a massa reduzida do par esfera e cilindro.

Da equação 24, a distribuição de pressão  $P(x, y)$  na interface de contato é

$$P(x, y) = \frac{3F}{2\pi ab} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}},$$

que é máxima em  $x = 0$  e  $y = 0$ , isto é,

$$P(0, 0) = \frac{3}{2} \frac{F}{\pi ab}. \quad (64)$$

Da equação (34),

$$b = a\sqrt{1 - e^2}.$$

portanto,

$$P(0, 0) = \frac{3}{2\pi(1 - e^2)} \frac{F}{a^2}. \quad (65)$$

Substituindo as equações (59), para  $a$ , e (61) para  $F$ , na equação (65), encontramos, finalmente:

$$P(0, 0) = \frac{3}{4(1 - e^2)} \frac{Y_{ef}}{(2R_r G_1 G_2)^{1/2}} \xi^{1/2}. \quad (66)$$

Na equação (66), com exceção da deformação  $\xi$ , todos os demais parâmetros são características dos corpos em contato, como a geometria e a resistência dos mesmos. Portanto, para um dado par de esfera e cilindro, a pressão no centro da interface de contato, onde ela é máxima, depende exclusivamente da deformação  $\xi$ .

A pressão  $P(0, 0)$  atingirá o seu máximo  $P_{\max}(0, 0)$  quando  $\xi$  for o máximo  $\xi_{\max}$ . O valor máximo de  $\xi$  é dado em função da velocidade relativa entre a esfera e o cilindro pela equação (63). Substituindo a equação (63) na equação (66), concluímos, finalmente, que a pressão máxima no centro da região de contato interno entre a esfera e o cilindro, é:

$$P_{\max}(0, 0) = \frac{3}{4(1 - e^2)} \left[ \frac{5}{16\pi} \frac{Y_{ef}^4}{G_1 G_2^3 R_r^3} v^2 \right]^{1/5}. \quad (67)$$



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO T19. American Association of State Highway and Transportation Officials T 19: Standard Method of Test for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate, 2009.

AASHTO T-305. American Association of State Highway and Transportation Officials T-305: Determination of Draindown Characteristics in Uncompacted Asphalt Mixtures, 2009.

AASHTO TP-31-96. Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension. American Association of State Highway and Transportation Officials, Estados Unidos, 2000.

AHMARUZZAMAN, M. BHATTACHARJEE, A. CuO nanostructures: Facile synthesis and applications for enhanced photodegradation of organic compounds and reduction of p-nitrophenol from aqueous phase. Department of Chemistry. National Institute of Technology. Silchar-788010, Assam. India, 2016.

AMIRKHANIAN, A.N.; XIAO, F.; AMIRKHANIAN, S. N. Characterization of Unaged Asphalt Binder Modified with Carbon Nano Particles. *International Journal of Pavement Research and Technology*. Vol 4. P 281-286. 2011.

ARAGÃO, A.F; CAMPELO, N. S; CAMPOS, A. M. L. da S. Comparative analysis of asphalt concrete mixtures employing pebbles and synthetic coarse aggregate of calcined clay in the Amazon region. **International Journal of Pavement Engineering**, 2017.

ARAGÃO, F. T. S; PAZOS, A. R. G; MOTTA, L. M. G; KIM, Y; NASCIMENTO, L. A. H. Effects of Morphological characteristics of aggregate particles on the mechanical behavior of bituminous paving mixtures. *Construction and Building Materials*, vol 123, pp 444-453, 2016.

ASTM C127. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. American Society for Testing and Materials, 2012.

ASTM C128. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of fine Aggregate. American Society for Testing and Materials, 2012.

ASTM C136. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. American Society for Testing and Materials, 2006.

ASTM D 1188 – 96: Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Compacted Bituminous Mixtures Using Coated Samples. USA, 1996.

ASTM D 2041-00: Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures. II USA, 2000.

ASTM D 2726 – 04: Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Bituminous Mixtures. USA, 2004.

ASTM D 4123-82. Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures. American Society for Testing and Materials, 1995.

ASTM D 6925 – 03: Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyrotory Compactor. USA, 2003.

BAEK, J. Modeling reflective cracking development in hot-mix asphalt overlays and quantification of control techniques. PhD Dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois, 2010.

BALBO, José Tadeu. Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração. 558 p. Oficina de Textos. 2015.

BARBOSA, C. A.; CABRAL, A. M.; LIMA, C. A. DE P.; VALENÇA, P. DE M.; COSTA JR., J. J. DE F.; J.C.C. SALES JUNIOR; FROTA, C.A. Misturas SMA com RCD,

Nanomaterial proveniente de resíduo cerâmico e fibra do curauá. 45ª RAPv – Reunião Anual de Pavimentação e 19º ENACOR – Encontro Nacional de Conservação Rodoviária. Brasília, DF, 2016.

BARDESI, A. Introducción a las mezclas bituminosas. Curso de Mezclas Bituminosas: dosificación, fabricación, puesta en obra y control de calidad, Intevia, Barcelona; 2010.

BATISTA, F. G. S. **Caracterização Física e Mecânica dos Agregados de Argila Calcina Produzidos com Solos Finos da BR-163/PA**. Dissertação de Mestrado - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2004.

BAYOMY, F.; MASAD, E.; DESSOUKEY, S.; OMER M. Development and Performance Prediction of Idaho Superpave Mixes. Idaho Transportation Department. 2004.

BENJAMIN, C. **Avaliação crítica do programa de concessões rodoviárias no Brasil: estudo do lote 5 da segunda etapa do programa federal**, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

BERTOLDO, R. A; SOUZA, R. J. Q; CUNHA, T. M. F; FROTA, C. A. Estudo da Influência do Polímero SBS na Resistência à Tração de Misturas Asfálticas utilizando Areia de Resíduos Sólidos de Construção e Demolição - RCD e Areia Tradicional para o Município de Manaus. In: **Anais...** Congresso de Infraestrutura de Transportes, 4. São Paulo: ANDIT.2010.

BRANTHAVER, J.F; PETERSEN J.C.; ROBERTSON, R.E.; DUVALL, J.J.; KIM, S.S.; HARNBERGER, P.M.; MILL, T; ENSLEY, E.K.; BARBOUR, F.A.; SCHABRON, J.F.; Binder Characterization and Evaluation, Vol. 2: **Chemistry**, SHRP-A-368, National Research Council, Washington, DC, 1993.

BRITO, L. A. Teixeira; GRAEFF, A. G. Avaliação da Metodologia de Cálculo para determinação do Módulo de Resiliência por Compressão Diametral para fins de Projeto de Pavimento e Controle de Qualidade de Obras. Relatório Final de Pesquisa - Concessionária da Rodovia Osório-Porto Alegre – CONCEPA. 2008.

BROWN, S. F. "Soil mechanics in pavement engineering". **Geotechnique**. Vol 46, No 3. pp 383-426. 1996.

BROWN, S. F. and SCHOLZ, T. Development of laboratory protocols for the ageing of asphalt mixtures. *Proc. 2nd Eurasphalt and Eurobitume Congress.*: 83-90, 2000.

Cabral, E.M., *et al.*, 2013. Calcined clay applied in concrete. In: S. Thomas, M. Sebastian, A. George, and Y. Weimin, eds. **Advances in materials science, recycling and reuse of materials and their products**, vol. 3. London: CRC Press, 35–52, 2013.

Cabral, G.L.L. Calcined clay aggregate: a feasible alternative for Brazilian road construction. In: E. Ellis, H.S. Yu, G. McDowell, A. Dawson and N. Thom, eds. *Advances in transportation geotechnics*. London: Taylor & Francis Group, 90–96, 2008.

CARNEIRO, F.L. Um novo método para determinação da resistência à tração dos concretos. Rio de Janeiro: Instituto Nacional de Tecnologia, 1943.

CAVALCANTE, D. G. “Composição de misturas asfálticas com ligante modificado por polímeros (SBS e EVA) e agregados sinterizados de argila calcinada (ASAC) para Manaus-AM.” In: Reunião de Pavimentação Urbana, 17<sup>a</sup>., 2011a, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: ABPv, 2011.

CAVALCANTE, D. G.; SOUZA, R. J. Q.; CUNHA, T. M.F.; FROTA, C. A. Estudo da Resistência à Tração de Misturas Asfálticas Utilizando Ligante Modificado com SBS e Agregados Sinterizados de Argila Calcinada para Construção das Vias Urbanas de Manaus-AM. In: Congresso de Infraestrutura de Transportes, 4, 2010, São Paulo, **Anais...** São Paulo: ANDIT, 2010.

CHEN, Y.; CRITTENDEN, J. C.; HACKNEY, S.; SUTTER, L.; HAND, D. W. Preparation of a Novel TiO<sub>2</sub>-Based p-n Junction Nanotube Photocatalyst. **Environmental Science & Technology**, v. 39, p. 1201-1208, 2007.

CHEN, H.; XU, Q.; CHEN, S.; ZHANG, Z. Evaluation and design of fiber-reinforced asphalt mixtures. **Journal of Materials and Design**. Vol. 30, pp. 2595-2603, 2010.

CHOI, Y. T and KIM, Y. R. “Development of characterisation models for incremental permanent deformation model for asphalt concrete in confined compression”. **Road Materials**. Pavement Des., vol14, pp 266–288, 2013.

CNT. Confederação Nacional de Transportes. Pesquisa CNT de Rodovias: Relatório Gerencial. Brasília: CNT, SEST, SENAT. 2016.

COELHO, A.; DE BRITO, J. Environmental analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal - Part II: environmental sensitivity analysis. **Waste Manager**, Vol 33, pp 147e161, 2013.

COOK, J. R.; PETTS, R. C.; ROLT, J. Low Volume Rural Road surfacing and Pavements, a guide to good practice, June 2013.

CUNHA, M. J. A. Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas com Agregados Sinterizados de Argila Calcinada. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2014.

DIPANKAR C, MURUGAN, S. The green synthesis, characterization and evaluation of the biological activities of silver nanoparticles synthesized from Iresine herbstii leaf aqueous extracts. **Colloids Surf B: Biointerfaces**, vol 98, pp 112–119, 2012.

DNER-EM 367/97 - Material de enchimento para misturas betuminosas. Rio de Janeiro, 1997.

DNER-ME 079/94. Agregado: Adesividade a Ligante Betuminoso. 1994.

DNER-ME 081/98. Agregados: Determinação da Absorção e da Densidade de Agregado Graúdo. 1998.

DNER-ME 084/95. Agregado miúdo: Determinação de Densidade Real. 1995

DNER-ME 085/94. Material Finamente Pulverizado: Determinação da Massa Específica Real. 1994.

DNER-ME 194/98. Agregados: Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, 1998.

DNIT 136/2010-ME. Pavimentação asfáltica: Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral. 2010.

DU, H.; PANG, S.D. “Enhancement of Barrier Properties of Cement Mortar with Graphene Nanoplatelet,” **Cement and Concrete Research**. Vol 76, pp. 10-19, 2015.

Fabício, J.M. Development of a clay aggregate mobile plant (inPortuguese). *In: 21st Brazilian Annual Pavement Congress*, vol. 1.Salvador: Brazilian Pavement Association, 150–188, 1986.

Feynman, R. P. in *Nanotechnology: Science, Innovation, and Opportunity*.ed. **Foster**, L. pp247- 268, Prentice Hall, 2006.

FROTA, C. A. SANTOS, C. L. M. SILVA, G.R. PEREIRA, R. V. Caracterização de solos para a obtenção de agregado sintético de argila calcinada. **In: Reunião Anual de pavimentação**, 35<sup>a</sup>RAPv. Rio de Janeiro, 2004.

FROTA, C. A.; F. R. G NUNES; e C. L. SILVA. “Estudo da Substituição do Seixo porAgregados Sintéticos de Argila Calcinada”.12<sup>a</sup>. Reunião de Pavimentação Urbana. Aracaju,SE, 2003.

FROTA, C. A.; NUNES, F. R. G.; MELO, D. M.; SANTOS, M. G. R. Mechanical performance of asphalt mixtures composed of synthetic calcinated clay aggregates. **Cerâmica**, vol 53, pp 255-262, 2007.

FROTA, C. A.; SILVA, C. L.; NUNES, F. R. G. Análise do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Confeccionadas com Agregados Sintéticos de Argila Calcinada. In: JORNADAS LUSO-BRASILEIRAS DE PAVIMENTOS: POLÍTICAS E TECNOLOGIAS, 5., 2006, Recife. [Anais eletrônicos...] São Paulo: Editora, 2006. 1 CD-ROM.

FROTA, C. A.; SILVA, C. L.; NUNES, F. R. G.; MELO, D. M.; SANTOS, M. G. R. Desempenho mecânico de misturas asfálticas confeccionadas com agregados sintéticos de argila calcinada. *Cerâmica*, São Paulo, v. 3, p. 255-262,2007.

GEORGE, T. B; BOATENG, J. K. Assessment on the Sustainable Use of Alternative Construction Materials as Substitutite to Natural Aggregates. Fourth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies. Las Vegas, USA, 2016.

GUO, X; SUN, M; DAI, W; CHEN, S. “Performance Characteristics of Silane Silica Modified Asphalt”. **Advances in Materials Science and Engineering**, 2016.

HABID, N. Z.; AUN, N. C; ZOOROB, S. E.; ING, L. P. Use of Graphene Oxide as a Bitumen Modifier: An innovative Process Optimization Study. **ResearchGate**, 2015.

HAMED, F. K. M. Evaluation of fatigue resistance for modified asphalt concrete mixture based on dissipate energy concept [Ph.D. thesis], Technische Universit“at Darmstadt, Darmstadt, Germany, 2010.

HASSANI, A.; FAKHIM, B.; GHODDOUSI, P. The Influence of Graphene Oxide on Mechanical Properties and Durability Increase of Concrete Pavement. **International Journal of Transportation Engineering**, vol 2, 2014.

- HAWKES, I. & MELLOR, M. Uniaxial Test in Rock Mechanics Laboratories. **Engineering Geology**, vol 4,1970.
- HVEEM, F.N. Pavement deflection and fatigue failures. Bulletin 114, p 43-87, 1955.
- IDHAM, M. K; HAININ, M. R, WARID, M. N. M; RAMAN, N. A. A; MAMAT, R. Evaluation on the performance of aged asphalt binder and mixture under various aging methods. **Jurnal Teknologi** (Sciences & Engineering), pp 7- 12, 2015.
- IJIMA, S. Helical microtubes of graphitic carbon. **Nature**.Vol 354. pp. 56-58. 1991.
- INSTITUTO DO ASFALTO. Manual do Asfalto. Brasil: 2002.
- KANDHAL, P. S; CHAKRABORTY, S. Effect of Asphalt Film Thickness on Short- and Long- Term Aging of Asphalt Paving Mixtures. Transportation Research Record 1535, Washington, DC, 1996.
- KAZI, S. N.; BADARUDIN, A. Investigation on the use of graphene oxide as novel surfactant to stabilize weakly charged graphene nanoplatelets. *Nanoscale Research Letters*. Vol 10. P 212, 2015.
- KHITAB, A.; ASHAD, M. T. "Nano Construction Materials: review. **Advanced Materials**. Vol 38, pp 181-189, 2014.
- KIM, K.; REGAN, W.; GENG, B., ALEMAN, B.; KESSLER, B.M.; WANG, F.; CROMMIE, M.F.; ZETTL, A. "High-Temperature Stability of Suspended Single-Layer Graphene," **Physica Status Solidi**. RRL4. No. 11. pp. 302–304.2010.
- KUN, P.; WEBER, F.; BALÁZSI, C. Preparation and examination of multilayer graphene nanosheets by exfoliation of graphite in high efficient attritor mill. **Central European Journal of Chemistry**. Versita. Vol 9(1). pp 47-51. 2011.
- LE, J.; MAASTEANU, M.; TUROS, M. "Graphene Nanoplatelet (GNP) Reinforced Asphalt Mixtures: A Novel Multifunctional Pavement Material, Final Report for NCHRP IDEA Project 173. University of Minnesota. 2016.
- LE, J.; MAASTEANU, M.; TUROS, M. "Graphene Nanoplatelet (GNP) Reinforced Asphalt Mixtures: A Novel Multifunctional Pavement Material, Final Report for NCHRP IDEA Project 173. University of Minnesota, 2016.
- LEE, C., X. WEI, J. W.; KYSAR, J.; HONE. "Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene". **Science**.vol 321, pp. 385, 2008.
- LEON, V.; RODRIGUEZ, A. M.; PRIETO, P.; PRATO, M.; VÁSQUEZ, E. Exfoliation of Graphite with Triazine Derivates under Ball-Milling Conditions: Preparation of Few-Layer Graphene via Seletive Noncovalent Interactions. **ACS NANO**.vol XXX. 2013.
- LIU, X.M.; WU, S.P.; LI, Ning. Self-monitoring application of asphalt concretecontaining graphite ans carbon fibers. *J Wuhan Univ Of Tech (Mater Sci Ed)* pp 268–71, vol 23(2), 2008.
- LOCKREY, S.; NGUYEN, H.; CROSSIN, E.; VERGHESE, K. Recycling the construction and demolition waste in Vietnam: opportunities and challenges in practice. **Journal of Cleaner Production**. Vol133, Pp 757-766, 2016.

- MAKAR, J. M.; MAKAR, J. J. "Carbon nanotubes and their applications in the construction industry," **in Nanotechnology in Construction**, Proceedings of the 1st International Symposium on Nanotechnology in Construction, P. J. M. Bartos, J. J. Hughes, P. Trtik, and W. Zhu, Eds. pp.331–341. Royal Society of Chemistry, 2004.
- MASHAAN, N. S; HASSAN, A; KARIM, M. R.; ABDELAZIZ, M. A Review on Using Crumb Rubber in Reinforcement of Asphalt Pavement. **The Scientific World Journal**. 21p, 2014.
- MELO, J., TRICHES, G. Evaluation of the influence of environmental conditions on the efficiency of photocatalytic coatings in the degradation of nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), *Building Environmental*. Vol 49, Pp 127-133, 2012.
- MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. História do Ministério dos Transportes. Disponível em <<http://www.transportes.gov.br/conteudo/137-evolucao-cronologia-do-ministerio-dos-transportes>>. Acesso em fevereiro de 2017.
- Mo L, Huurman M, Wu S, Molenaar AAA. Raveling investigation of porous asphalt concrete based on fatigue characteristics of bitumen-stone adhesion and mortar. **Materials & Design**, vol 30, pp 170-9, 2009.
- MOKHATAB, S., FRESKY, M.A., ISLAM, M.R.: Application of Nanotechnology in Oil and Gas E&P. JPT, **Society of Petroleum Engineers**, 2006.
- MONTES-MORÁN, M. A, YOUNG, R. J. Raman spectroscopy study of HM carbon fibres: effect of plasma treatment on the interfacial properties of single fibre/ epoxy composites. **Carbon**, Elsevier Science, vol 40, pp 845-855. 2002.
- MOON, K. H; FALCHETTO, A.C; MARASTEANU, M; TUROS, M. Using Recycled Asphalt Materials as an Alternative Material Source in Asphalt Pavements. **Journal of Civil Engineering**, vol 18 (1), pp 149-159, 2014.
- MORENO, F; RUBIO, M.C. Effect of aggregate nature on the fatigue- cracking behavior of asphalt mixes. **Materials & Design**, vol 47, pp 61-67, 2012.
- MOROVA, N. "Investigation of usability of basalt fibers in hot mix asphalt concrete," **Construction and Building Materials**, vol 47, pp 175-180, 2013.
- MOTLAGH, A. A.; KIASAT, A.; MIRZAEI, E.; BIRGANI, F.O. "Bitumen Modification Using Carbon Nanotubes". **World Applied Sciences Journal**. Vol 18 (4), pp 594-599, 2012.
- MOTLAGH, A. A.; KIASAT, A.; MIRZAEI, E.; BIRGANI, F.O. "Bitumen Modification Using Carbon Nanotubes". **World Applied Sciences Journal**, vol 18 (4), pp 594-599, 2012.
- NAPA. National Asphalt Pavement Association. Designing and Constructing SMA Mixtures – State of the Practice. Quality Improvement Series 122. EUA. 2002.
- NASCIMENTO, R. R. Utilização de Agregados de Argila Calcinada em Pavimentação; Uma Alternativa para o Estado do Acre. 2005. 171 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

- National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) (2001). Recommended use of reclaimed asphalt pavement in the superpavemix design method: Guidelines, Research Results Digest 253.
- NOVOSELOV, K.S.; FAL'KO, V.I.; COLOMBO, L.; GELLERT, P.R; SCHWAB M.G.; KIM K. A roadmap for graphene. **Nature**, vol 490, pp 192–200, 2012.
- PALERMO, V. Not a Molecule, Not a Polymer, Not a Substrate... the Many Faces of Graphene as a Chemical Platform. **Chem. Commun.** Vol 49. Pp 2448-2857. 2013.
- PENG, Q.; HUANG, Z.; ZHU, J. Fabrication of Large- Area Silicon Nanowire p-n Junction Diode Arrays. **Advanced Materials**. Vol 16, pp 73, 2004.
- PICANÇO, H. M. CARTAXO, E. F. FROTA, C. A. PEREIRA. P, H, S. “Refletividade, Radiação Solar e Temperatura em Diferentes Tipos de Revestimentos das Vias Urbanas no Município de Manaus (AM) ”. 5º Congresso de Infraestrutura de Transportes. São Paulo. 2011.
- RAMSDEN, J. J. Nanotechnology: An Introduction., 2016.
- ROYAL SOCIETY AND ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING (2004). Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties. London: RS-RAE. Disponível em [http://royalsociety.org/Report\\_WF.aspx?pageid=9692&terms=nanotechnologies](http://royalsociety.org/Report_WF.aspx?pageid=9692&terms=nanotechnologies). Acesso em 12 fev. 2017.
- SALAMANCA-BUENTELLO, F., PERSAD, D.L., COURT, E.B., MARTIN, D.K., DAAR, A.S. and SINGER, P.A., Nanotechnology and the developing world. **PLoS Medicine**, Vol 2(5), pp. 383-386, 2005.
- SANCHEZ, F., SOBOLEV, K. Nanotechnology in concrete – a review, **Construction Building Materials**, vol 24, pp 2060–2071, 2010.
- SANTOS, K.P.; LUCENA, A.E.F.L.; LUCENA, L.C.F.L.; SILVA, J.A.A.; COSTA, S.C.F.E. Estudo da incorporação de argilas montmorilonitas em cimentos asfálticos de petróleo. **Matéria** (UFRJ), vol. 20, p. 501-513,2015.
- SANTOS, R. A.; VIEIRA, A.; OLIVEIRA, J. R. M. S.; CARNEIRO, L. A. V. Produção de agregado artificial de argila calcinada para emprego em pista experimental no estado do Rio de Janeiro. In: Reunião Anual de Pavimentação/ Encontro Nacional de Conservação Rodoviária, 38. 12., 2007, Manaus, [Anais eletrônicos...] Manaus: Manaus Editora, 2007. 1 CD-ROM.
- SCRIVENER, K.L.; KIRKPATRICK, R.J. Innovation in use and research on cementitious material. **Cement and Concrete Research**, vol 38 (2), pp 128–136, 2008.
- SHAW, P. S. Stress-strain relationships for granular materials under repeated loading [*Ph.D. thesis*], Department of Civil Engineering, University of Nottingham, Nottingham, UK, 1980.
- SHRP The Superpave Mix Design Manual for New Construction and Overlays – SHRP-A407. Strategic Highway Research Program. National Research Council, Washington DC, USA. 1994.



- SILVA, A. C. L. Comportamento Mecânico de Compósitos Asfálticos com argila calcinada sob flexão à quatro pontos. Dissertação Mestrado – Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2014.
- SILVA, C. L. “Comportamento Mecânico de Compósitos Asfálticos com Argila Calcinada sob flexão a quatro pontos”. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Amazonas - UFAM, Manaus, AM, 2014.
- SILVA, C. L. “Módulo Dinâmico de Misturas Asfálticas Confeccionadas com Agregados Sinterizados de Argila Calcinada”. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Amazonas - UFAM, Manaus, AM, 2011.
- SILVA, C.L. Módulo Dinâmico de Misturas Asfálticas confeccionadas com agregados sinterizados de argila calcinada. Dissertação Mestrado – Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2011.
- SIMAS, L.; VALENÇA, P.; FROTA, C. Análise superficial de revestimentos do tipo areia asfalto no município de Manaus (AM). **Estudos Tecnológicos (Online)**. V.9. p.1-10. 2013.
- SUN, L.; XIN, X.; REN, J. “Asphalt modification using nano-materials and polymers composite considering high and low temperature performance. **Construction and Building Materials**. Vol 133, Pp 358-366, 2016.
- TONIAL, I. A. Influência do Envelhecimento do Revestimento Asfáltico na Vida de Fadiga de Pavimentos. Tese de M.sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2001.
- TOUMEY, C. **Techné** 12, pp 133–168, 2008. Lamb, L.D. and Huffman, D.R. Fullerene Production, **Journal of Physics and Chemistry of Solids**, vol 54(12), pp. 1635-1643, 1993.
- VALENÇA, P. DE M. A. Desempenho mecânico de misturas asfálticas do tipo Stone Matrix Asphalt com uso de fibras amazônicas e agregados de resíduos de construção e demolição. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos da Amazônia) — Universidade Federal do Amazonas, Manaus: UFAM, 2012. 114f.
- VIEIRA, A. Agregados de argila calcinada: uma alternativa para a pavimentação rodoviária na região amazônica. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 32., 2000, Brasília. [Anais eletrônicos...] Brasília: Manaus Editora, 2000. 1 CD-ROM.
- WILLIAMS, R.C; HILL, D; HOFMANN, K.; ZELENOCK, M. BAUSANO, J. Development of Laboratory Performance Test Procedures and Trial Specifications for Hot Mix Asphalt: Final Report. Michigan Technological University. 2004.
- YAMURA, A. P.G.; Aplicação de nanotecnologia no meio ambiente: biossorvente magnético na remoção de urânio. Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo, 2009.
- YANG, J.; TIGHE, S. A review on advance of nanotechnology in asphalt mixtures. **Procedings – Society Behavior Science**; vol 96, Pp 1269–76 ,2013.

YAO, H.; YOU, Z.; LI L.; LEE C. H.; WINGARD, D.; YAP Y. K. Properties and chemical bonding of asphalt and asphalt mixtures modified with nanosilica. **Journal Materials Civil Engineer**, 2012.

YILDIRIM, Y.; MANSOUR, S.; KENNEDY, T.W. Mixing and Compaction Temperatures for hot mix Asphalt Concrete. Project conducted in cooperation with the Federal Highway Administration. Austin, Texas. 2000.

YOU, Z., MILLS-BEALE, J., FOLEY, J. M., ROY, S., ODEGARD, G. M., DAI, Q.; GOH, S. W. Nanoclay-modified asphalt materials: preparation and characterization. **Construction Building Materials**. vol 25, pp 1072–1078, 2011.

YOU, Z., MILLS-BEALE, J., FOLEY, J. M., ROY, S., ODEGARD, G. M., DAI, Q.; GOH, S. W. Nanoclay-modified asphalt materials: preparation and characterization. **Construction Building Materials**. vol 25, pp 1072–1078, 2011.

