



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG

CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS - CTRN

UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL - UAEC

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL – PPGECA

CAMPUS I – CAMPINA GRANDE

ÁREA GEOTÉCNICA

Gabryelle Keith Avelino Cruz

**INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES MORFOLÓGICAS E DOS MÉTODOS DE
SELEÇÃO GRANULOMÉTRICA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
MISTURAS ASFÁLTICAS**

Campina Grande – PB

2018

GABRYELLE KEITH AVELINO CRUZ

**INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES MORFOLÓGICAS E DOS
MÉTODOS DE SELEÇÃO GRANULOMÉTRICA NAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS**

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

Área de concentração: Geotécnica

Orientadora: Prof^a. DSc Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena

Campina Grande – PB

2018

C957i

Cruz, Gabryelle Keith Avelino.

Influência das propriedades morfológicas e dos métodos de seleção granulométrica nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas / Gabryelle Keith Avelino Cruz. - Campina Grande, 2018.

166 f : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2018.

"Orientação: Profa. Dra. Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena".

Referências.

1. Misturas Asfálticas. 2. Seleção Granulométrica. 3. Agregados Lateríticos. 4. Resistência Mecânica. I. Lucena, Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes. II. Título.

CDU 625.85(043)

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO BIBLIOTECÁRIO GUSTAVO DINIZ DO NASCIMENTO CRB - 15/515

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor (a): Gabryelle Keith Avelino Cruz

Título: **INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES MORFOLÓGICAS E DOS MÉTODOS DE SELEÇÃO GRANULOMÉTRICA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS.**

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

Área de Concentração – Geotécnica

Dissertação defendida e aprovada em: 10/08/2018

Pela Banca Examinadora:

Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena

Orientadora: Prof^a. DSc Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

Adriano Elísio de F. S. Lucena

Avaliador Interno: Prof. DSc Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes Lucena
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

Suely Helena de Araújo Barroso

Avaliadora Externa: Prof^a. DSc. Suely Helena de Araújo Barroso
Universidade Federal do Ceará – UFC

DEDICATÓRIA

A Deus, pai de amor, meu guia e refúgio.

À minha família por sempre torcerem e darem apoio.

A meu amado esposo pelo amor, carinho e paciência.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pai de amor e misericórdia, por todas as graças e conquistas de minha vida, pelos desafios que me fortalece a enfrentar e por ser o autor da realização dos melhores planos. A ti, toda honra por todo o sempre.

À Nossa Senhora, mãe intercessora, por seu amor e proteção, por estar sempre à frente intercedendo e guiando os caminhos e escolhas.

À minha orientadora, professora Lêda Christiane, por toda disponibilidade e paciência. Obrigada pelo incentivo, por todo auxílio acadêmico e intelectual, pelos conhecimentos compartilhados, pelo melhor exemplo de dedicação, competência e maestria na docência. Seu exemplo seguirá comigo, muito obrigada!

Aos meus pais, Judecir e Maurício, por todo amor, cuidado e incentivo. Obrigada por acreditarem em mim e investirem em cada etapa com confiança.

Ao meu melhor e mais fiel amigo, companheiro de todas as horas, meu esposo, Francisco Luiz Júnior, por trazer momentos de paz em meio às turbulências, muito obrigada por todo apoio, paciência e dedicação. Obrigada por acreditar em mim e me fazer acreditar que é possível sempre. A você meu eterno amor.

Ao meu irmão, Arthur Múcio, pelo apoio, incentivo e momentos de descontração, e especialmente pelo melhor presente, o pequeno João Arthur, o amor mais puro.

Aos meus avós, Julieta e José (*in memorian*), e Maria (*in memorian*) e José, pelo exemplo de amor e humildade.

Aos meus sogros, Lourdes e Luiz, e cunhadas, Adma, Lizandra, Betânia e Júlia por toda torcida e carinho sempre. Vocês são presentes de Deus.

A todos os familiares e amigos, por toda torcida, orações e boas vibrações.

À minha querida turma de mestrado, juntas somos uma equipe. Obrigada por toda ajuda e pelos conhecimentos compartilhados e vivenciados.

Aos amigos Daniel, Valter, Jadilson e Joseildo (Ildinho), por toda ajuda na realização dos ensaios, pelas boas risadas e bons momentos de convivência.

Aos amigos que o LEP me concedeu, por tornarem a jornada mais leve e os dias mais felizes. Em especial à amiga Kênia por todo apoio e palavras de carinho.

Às minhas queridas orientandas, Nathália e Drihelly, obrigada por todo auxílio na realização dos experimentos, pela amizade e pelos bons momentos compartilhados. Minha gratidão a vocês.

Aos professores Adriano Elísio e Suelly Helena, pela participação na banca examinadora e pelas valiosas contribuições a este trabalho.

Aos professores do LEP Ana Maria, Adriano Elísio, John Kennedy e Veruscka Escarião por todo conhecimento repassado. Muito obrigada!

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECA), pela oportunidade e acompanhamento nas etapas burocráticas.

Ao Laboratório de Engenharia de Pavimento (LEP), por fornecer toda a base necessária à realização desta pesquisa e por se tornar uma segunda casa, onde todos juntos são uma verdadeira família.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos para realização desta pesquisa.

A todos que contribuíram de alguma forma para a realização desta pesquisa.

Muito obrigada!

Aos outros dou o direito de ser como são.
A mim, dou o dever de ser cada dia melhor.

(Chico Xavier)

RESUMO

Os agregados são responsáveis por resistir a cerca de 80% dos esforços impostos ao pavimento, tornando a sua seleção adequada um importante fator para a produção de misturas asfálticas resistentes. A utilização de métodos de seleção granulométrica possibilita a identificação de uma mistura asfáltica capaz de resistir de maneira mais eficiente aos esforços impostos ao pavimento, bem como a possibilidade de utilização de agregados distintos. Esta pesquisa teve como objetivo avaliar a influência das características morfológicas de agregados graníticos e lateríticos e dos métodos de seleção granulométrica na resistência de misturas asfálticas. Para avaliar as características dos agregados foram realizados ensaios de granulometria, massa específica e absorção, índice de forma, equivalente de areia, partículas alongadas e achatadas, partículas fraturadas, angularidade, durabilidade, adesividade e abrasão Los Angeles. As amostras também foram submetidas ao *AIMS2 (Aggregate Image Measurement System - 2)* para avaliar mais adequadamente as características de angularidade, textura e forma. Três métodos de seleção granulométrica: o do DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte), o Bailey e o Francês foram utilizados para selecionar as misturas a serem avaliadas. O método de avaliação FAD (Faixa de Agregados Dominantes) foi utilizado para prever o comportamento das misturas frente às deformações permanentes. As misturas elaboradas tiveram sua resistência avaliada por meio das propriedades (escorrimento, estabilidade Marshall, Lottman modificado, resistência à tração, cântabro, módulo de resiliência, fadiga à tensão controlada, módulo dinâmico e *flow number*). Os resultados indicaram a importância da consideração de metodologias de caracterização dos agregados, para obtenção de medidas mais confiáveis e com menos influência do operador; do mesmo modo que revelou a importância da seleção granulométrica adequada. As análises permitiram concluir que a mistura utilizando agregado granítico selecionada pelo método DNIT foi a que apresentou melhor desempenho geral, enquanto que o método Francês possibilitou a obtenção de melhores respostas dentre as misturas utilizando agregados lateríticos. A avaliação das misturas mostrou que o agregado laterítico pode ser empregado em substituição a brita granítica convencional produzindo misturas com resistência adequada às exigências das normas vigentes.

Palavras chave: Misturas asfálticas. Seleção granulométrica. Agregados lateríticos. Resistência Mecânica.

ABSTRACT

The aggregates are responsible for resisting about 80% of the pavement stresses, making their adequate selection an important factor for the production of resistant asphalt mixtures. The granulometric selection methods application allows to identify an asphalt mixture capable of resisting the pavement stresses, as well as the possibility of using differentes aggregates. The objective of this research was to evaluate the influence of the lateritic aggregates morphological characteristics and the granulometric selection methods on the asphalt mixtures resistance. In order to evaluate the characteristics of the aggregates, were performed granulometry lab tests, specific mass and absorption, shape index, sand equivalent, elongated and flat particles, fractured particles, angularity, durability, adhesiveness and abrasion. These samples were also submitted to the AIMS2 (Aggregate Image Measurement System - 2) to better evaluate the angularity, texture and shape characteristics. Three granulometric selection methods: the DNIT (National Department of Transport Infrastructure), the Bailey, the French were used to select mixture to be evaluated. The DASR (Dominant Aggregates Siza Range) evaluation method was used to predict the behavior of the mixtures against permanent deformations. The elaborated mixtures had their resistance evaluated by means of the properties (sliding, Marshall stability, modified Lottman, tensile strength, weld, resilience modulus, controlled voltage fatigue, dynamic modulus and flow number). The results indicated the importance of considering the aggregates characterization methodologies to obtain more reliable measures and with less operator influence; in the same way that it revealed the importance of adequate granulometric selection. The analyzes allowed to conclude that the mixture using laterite aggregate selected by the French method was the one that presented better overall performance, while the DNIT method allowed to obtain better responses among the mixtures using granite aggregates. The evaluation of the mixtures revealed that the lateritic aggregate can be used instead of conventional granite to produce mixtures with resistance to the requirements of current standards.

Keywords: Asphalt mixtures. Granulometric selection. Lateritic aggregates. Mechanical Resistance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Forma (a) cúbica, (b) lamelar e (c) arredondada das partículas de agregados. __	6
Figura 2 - Ensaio de porcentagem de partículas fraturadas _____	9
Figura 3 - Exemplo de divisão entre agregado graúdo e fino em uma mistura com TMN 19,00 mm. _____	19
Figura 4 - Esquema do método de seleção da massa específica escolhida para os agregados graúdos. _____	21
Figura 5 - Esquema ilustrativo de divisões das graduações para análise em uma graduação contínua. _____	24
Figura 6 - Desenho esquemático da relação entre os níveis de projeto de misturas asfálticas do método francês e os respectivos ensaios _____	28
Figura 7 - Ilustração esquemática do modelo FAD-CI: conceito de FAD e CI. _____	32
Figura 8 - Componentes da mistura asfáltica para o cálculo da porosidade FAD. _____	33
Figura 9 - Percentual da extensão de rodovias federais pavimentadas por região _____	35
Figura 10 - Valores de estabilidade para misturas betuminosas do Norte e Nordeste do Brasil usando agregados lateríticos. _____	42
Figura 11 - Fluxograma do programa experimental da pesquisa. _____	46
Figura 12 - Agregado Granítico na fração 19.0 mm _____	48
Figura 13 - Agregado Granítico na fração 9.5 mm _____	48
Figura 14 - Agregado Granítico na fração Pó de Pedra. _____	48
Figura 15 - Agregado Laterítico na fração 19.0 mm. _____	49
Figura 16 - Agregado Laterítico na fração 9.5 mm. _____	49
Figura 17 - Agregado Laterítico na fração Pó de Laterita. _____	49
Figura 18 - Areia utilizada no preparo das misturas asfálticas. _____	50
Figura 19 - Cal Hidratada utilizada no preparo das misturas asfálticas _____	50
Figura 20 - CAP 50/70 utilizado nas misturas asfálticas. _____	51
Figura 21 - Paquímetro utilizado para realização do ensaio de partículas alongadas e achatadas. _____	54
Figura 22 - Ensaio de partículas fraturadas (exemplos). _____	55
Figura 23 - Equipamento utilizado para realização do ensaio de angularidade. _____	56
Figura 24 – Equipamento <i>AIMS 2</i> utilizado para realização dos ensaios. _____	57

Figura 25 – Partículas posicionadas na bandeja do equipamento para realização do ensaio.	58
_____	_____
Figura 26 - Ensaio de Adesividade.	60
Figura 27 – Determinação da Massa Específica Solta do Agregado Graúdo.	67
Figura 28 - Determinação da Massa Específica Compactada do Agregado Graúdo	68
Figura 29 - Determinação da Massa Específica Compactada do Agregado fino.	68
Figura 30 - Misturas realizadas para execução do ensaio de escoamento.	73
Figura 31 - Procedimentos de realização do ensaio de escoamento.	73
Figura 32 - Prato com amostra drenada após ensaio.	74
Figura 33 - Esquema de aplicação da compressão diametral.	74
Figura 34 - Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral.	75
Figura 35 - Ensaio de Estabilidade Marshall.	76
Figura 36 - Procedimento do ensaio de Lottman modificado.	78
Figura 37 - Equipamento utilizado e aspecto do corpo de prova antes e após realização do ensaio de Cântabro.	79
Figura 38 - Deslocamentos resilientes instantâneos.	80
Figura 39 - Prensa UTM-25 utilizada para realização do ensaio de fadiga.	81
Figura 40 - Estado de tensões de um corpo de prova submetido à compressão diametral	83
Figura 41 - Carregamento aplicado no ensaio uniaxial de carga repetida a 60°C.	86
Figura 42 - Curvas de distribuição granulométrica dos agregados da pesquisa.	88
Figura 43 – Resultado do parâmetro Forma 2D para o agregado granítico.	93
Figura 44 - Resultado do parâmetro Forma 2D para o agregado laterítico.	94
Figura 45 - Resultado do parâmetro angularidade para o agregado granítico.	95
Figura 46 - Resultado do parâmetro angularidade para o agregado laterítico.	96
Figura 47 - Resultado do parâmetro textura superficial para o agregado granítico.	97
Figura 48 - Resultado do parâmetro textura superficial para o agregado laterítico.	98
Figura 49 - Resultado do parâmetro CAAT para o agregado granítico.	99
Figura 50 - Resultado do parâmetro CAAT para o agregado laterítico	100
Figura 51 - Resultado da distribuição F&E das partículas do agregado granítico.	101
Figura 52 - Resultado da distribuição F&E das partículas do agregado laterítico.	101
Figura 53 - Resultados da avaliação do parâmetro esfericidade para o agregado granítico.	103
_____	_____
Figura 54 - Resultados da avaliação do parâmetro esfericidade para o agregado laterítico.	103
_____	_____

Figura 55 - Agregados após ensaio de adesividade. _____	106
Figura 56 - Curvas granulométricas das misturas estudadas na pesquisa. _____	108
Figura 57 - Diagrama de interação FAD. _____	109
Figura 58 - Gráfico Resistência à Tração × Tipo de Mistura. _____	114
Figura 59 - Gráfico Estabilidade Marshall × Tipo de Mistura. _____	115
Figura 60 - Gráfico Resistência à Tração Retida × Tipo de Mistura. _____	117
Figura 61 - Gráfico Desgaste Cântabro × Tipo de Mistura. _____	118
Figura 62 - Gráfico Módulo de Resiliência à 4°C × Tipo de Mistura. _____	119
Figura 63 - Gráfico Módulo de Resiliência à 21°C × Tipo de Mistura. _____	120
Figura 64 - Gráfico Módulo de Resiliência à 25°C × Tipo de Mistura. _____	120
Figura 65 - Gráfico Módulo de Resiliência à 37°C × Tipo de Mistura. _____	121
Figura 66 - Gráfico Vida de Fadiga × Diferença de Tensões - misturas do método DNIT. _____	123
Figura 67 - Gráfico Vida de Fadiga × Deformação Específica Resiliente - misturas do método DNIT. _____	123
Figura 68 - Gráfico Vida de Fadiga × Diferença de Tensões - misturas do método Bailey. _____	124
Figura 69 - Gráfico Vida de Fadiga × Deformação Específica Resiliente - misturas do método Bailey. _____	124
Figura 70 - Gráfico Vida de Fadiga × Diferença de Tensões - misturas do método Francês. _____	125
Figura 71 - Gráfico Vida de Fadiga × Deformação Específica Resiliente - misturas do método Francês. _____	125
Figura 72 - Gráfico Vida de Fadiga × Diferença de Tensões – todas as misturas avaliadas. _____	126
Figura 73 - Gráfico Vida de Fadiga × Deformação Específica Resiliente – todas as misturas avaliadas. _____	126
Figura 74 - Curva mestra da mistura Granítico DNIT. _____	130
Figura 75 - Curva mestra da mistura Laterítico DNIT. _____	130
Figura 76 - Curva mestra da mistura Granítico Bailey. _____	131
Figura 77 - Curva mestra da mistura Laterítico Bailey. _____	131
Figura 78 - Curva mestra da mistura Granítico Francês. _____	132
Figura 79 - Curva mestra da mistura Laterítico Francês. _____	132
Figura 80 - Curvas Mestras de todas as misturas avaliadas. _____	133

Figura 81 - Módulo Dinâmico das misturas avaliadas à 4°C. _____	134
Figura 82 - Módulo Dinâmico das misturas avaliadas à 21°C. _____	134
Figura 83 - Módulo Dinâmico das misturas avaliadas à 37°C. _____	135
Figura 84 - Ângulos de Fase referentes as frequências de carregamento na temperatura de 4°C. _____	136
Figura 85 - Ângulos de Fase referentes as frequências de carregamento na temperatura de 21°C. _____	136
Figura 86 - Ângulos de Fase referentes as frequências de carregamento na temperatura de 37°C. _____	137
Figura 87 - Curvas representativas do módulo dinâmico e módulo de resiliência das misturas utilizando agregados graníticos. _____	138
Figura 88 - Curvas representativas do módulo dinâmico e módulo de resiliência das misturas utilizando agregados lateríticos. _____	138
Figura 89 - Gráfico Módulo Dinâmico × Módulo de Resiliência para misturas utilizando agregados graníticos. _____	139
Figura 90 - Gráfico Módulo Dinâmico × Módulo de Resiliência para misturas utilizando agregados lateríticos. _____	140
Figura 91 - Resultados do <i>Flow Number</i> para as misturas analisadas. _____	141

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Faixas granulométricas e requisitos para Concreto Asfáltico (DNIT 031/2006 – ES).	15
Tabela 2 – Peneiras de controle de acordo com o Método Bailey	17
Tabela 3 - Parâmetros de Proporção utilizados no Método Bailey.	18
Tabela 4 - Limites quanto à distribuição granulométrica de partida de misturas do tipo EB-BBSG e EB-BBME do método francês (LCPC, 2007)	27
Tabela 5 - Classe de tráfego do método francês em função do volume diário médio de caminhões na faixa de projeto.	30
Tabela 6 - Características Marshall e mecânicas de misturas asfálticas usinadas a quente com laterita do Estado do Pará (Amaral, 2004).	41
Tabela 7 - Quantidades mínimas de partículas estabelecida para o ensaio <i>AIMS 2</i> .	57
Tabela 8 - Propriedades e classificação dos parâmetros <i>AIMS</i> .	59
Tabela 9 - Resultados da caracterização do ligante asfáltico utilizado na pesquisa.	63
Tabela 10 – Faixa C do DNIT, escolhida para utilização na Pesquisa (DNIT 031/2006 – ES).	65
Tabela 11 - Parâmetros da seleção granulométrica obtidos pelo método Bailey.	66
Tabela 12 – Tópico 14.03.2.2.4, faixa de agregados utilizada na pesquisa.	70
Tabela 13 - Níveis de tensão adotados para realização dos ensaios de fadiga.	82
Tabela 14 - Carga contato utilizada para cada temperatura do ensaio de módulo dinâmico.	85
Tabela 15 - Resultados dos ensaios de massa específica e absorção dos agregados.	89
Tabela 16 - Resultados obtidos para os ensaios de índice de forma.	90
Tabela 17 - Resultados obtidos para os ensaios de equivalente areia.	90
Tabela 18 - Resultados dos ensaios de partículas alongadas e achatadas (<i>F&E</i>).	91
Tabela 19 - Resultados dos ensaios de partículas fraturadas.	91
Tabela 20 - Resultados obtidos para os ensaios de angularidade.	92
Tabela 21 - Resultados do parâmetro <i>F&E</i> para os agregados analisados.	102
Tabela 22 - Resumo dos resultados dos parâmetros observados.	104
Tabela 23 - Resultados obtidos para os ensaios de durabilidade.	105
Tabela 24 - Resultados dos ensaios de adesividade.	106
Tabela 25 - Resultados obtidos para os ensaios de abrasão Los Angeles.	107

Tabela 26 - FAD e porosidades das misturas da pesquisa. _____	109
Tabela 27 - Quantitativos de material das misturas de projeto. _____	111
Tabela 28 - Parâmetros das misturas de projeto. _____	112
Tabela 29 - Resultados da avaliação da sensibilidade ao escorrimento. _____	113
Tabela 30 - Características das curvas de vida de fadiga das misturas avaliadas. _____	127

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABPv	Associação Brasileira de Pavimentação
AG	Proporção de Agregados Graúdos
AIMS	<i>Aggregate Image Measurement System</i>
AMPT	<i>Asphalt Mixture Performance Test</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BBME	<i>Béton Bitumineux à Module Élevé</i>
BBSG	<i>Béton Bitumineux Semi-Grenu</i>
CA	Cimento Asfáltico
CAA	<i>Coarse Aggregate Angularity</i>
CAAT	<i>Coarse Aggregate Angularity Texture Value</i>
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CI	Componentes Intersticiais
CNT	Conselho Nacional de Transportes
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia
CPA	Camada Porosa de Atrito
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EME	Misturas Asfálticas de Módulo Elevado
ES	Especificação de Serviço
F&E	Partículas Alongadas e Achatadas

FAA	<i>Fine Aggregate Angularity</i>
FAD	Faixa de Agregados Dominante
FAM	Proporção Fina do Agregado Miúdo
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
FN	<i>Flow Number</i>
GAM	Proporção Graúda do Agregado Miúdo
IDOT	Departamento de Transporte de Illinois
LCPC	<i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i>
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
ME	Método de Ensaio
Mín	Mínimo
MR	Módulo de Resiliência
NBR	Norma Brasileira
NF P	Norma Francesa Procedimento
NM	Norma Mercosul
NP	Norma Portuguesa
PB	Paraíba
PCG	Prensa de Cisalhamento Giratória
PCP	Peneira de Controle Primário
PCS	Peneira de Controle Secundário
PCT	Peneira de Controle Terciário
PM	Peneira Média
RBV	Relação Betume Vazios

RCDs	Resíduos de Construção e Demolição
RRT	Resistência Retida à Tração
RT	Resistência à Tração
RTc	Resistência à Tração Condicionada
RTFOT	Rolling Thin Film Oven Test
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
SMA	<i>Stone Matrix Asphalt</i>
SNV	Sistema Nacional de Viação
SP	Spindle
SUPERPAVE	<i>Superior Performing Asphalt Pavements</i>
TMN	Tamanho Máximo Nominal
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UIAIA	<i>University of Illinois Aggregate Image Analyzer</i>
UTM	<i>Universal Testing Machines</i>
VAM	Vazios no Agregado Mineral
VDG	<i>Videograder</i>
VI	Volume Intersticial
VIS	<i>Video Imaging System</i>
Vv	Volume de vazios

LISTA DE SÍMBOLOS

$ E^* $	Módulo dinâmico
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
cm^3	Centímetros cúbicos
cP	Centipoise
D	Diâmetro do corpo de prova
EM	Resistência ao esmagamento
f	Índice de forma
g	Gramas
g/cm^3	Gramas por centímetro cúbico
H	Altura do corpo de prova
Hz	Hertz
$K1;n1; K2; n2$	Parâmetros determinados no ensaio de fadiga
kgf	Quilograma-força
kN	Kilonewton
kN/m^3	Kilonewton por metro cúbico
kPa	Kilopascal
Log	Logarítmica
m^3	Metro cúbico
mm	Milímetro

MPa	Megapascal
N	Newton
n°	Número
N_{projeto}	Número de giros de projeto para compactação SUPERPAVE
P/A	Proporção pó asfalto
$P_{\text{mín}}$	Carga de contato
R^2	Coefficiente de determinação
rpm	Rotações por minuto
s	Segundo
SO_4Na_2	Sulfato de sódio
γ_A	Massa específica aparente
$\Delta\sigma$	Diferença de tensões no centro do corpo de prova
σ_t	Resistência à tração indireta
ε_i	Deformação resiliente específica

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XIV
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XVI
LISTA DE SÍMBOLOS	XIX
CAPÍTULO 1	1
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	3
1.1.1 Objetivo Geral	3
1.1.2 Objetivos Específicos	3
1.2 Organização do Trabalho	4
CAPÍTULO 2	5
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Morfologia dos Agregados	5
2.1.1 Métodos de Avaliação da Morfologia	8
2.2 Distribuição Granulométrica de Misturas Asfálticas	12
2.3 Seleção Granulométrica de Misturas Asfálticas	13
2.3.1 Método do DNIT	14
2.3.2 Método Bailey	16
2.3.3 Método Francês	24
2.3.4 Método da Faixa de Agregados Dominante (FAD)	31
2.4 Pavimentação no Brasil e o Uso de Materiais Alternativos	34
2.4.1 Laterita como Material Alternativo	37
2.5 Considerações Finais	43
CAPÍTULO 3	45
3 METODOLOGIA	45

3.1	Materiais _____	47
3.1.1	Agregados _____	47
3.1.2	Ligante Asfáltico _____	51
3.2	Métodos _____	51
3.2.1	Caracterização dos Agregados _____	52
3.2.2	Caracterização do Ligante Asfáltico _____	61
3.2.3	Seleção Granulométrica _____	64
3.2.4	Análise da FAD _____	70
3.2.5	Dosagem e Compactação das Misturas _____	71
3.2.6	Propriedades das Misturas Asfálticas _____	71
CAPÍTULO 4 _____		87
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES _____	87
4.1	Caracterização dos Agregados _____	87
4.1.1	Distribuição Granulométrica _____	87
4.1.2	Massa Específica e Absorção _____	89
4.1.3	Índice de Forma _____	90
4.1.4	Equivalente Areia _____	90
4.1.5	Partículas Alongadas e Achatadas (<i>F&E</i>) _____	90
4.1.6	Partículas Fraturadas _____	91
4.1.7	Angularidade _____	92
4.1.8	<i>AIMS</i> _____	92
4.1.9	Durabilidade _____	105
4.1.10	Adesividade _____	106
4.1.11	Abrasão Los Angeles _____	107
4.2	Análise da FAD _____	107
4.3	Dosagem e Compactação das Misturas _____	111
4.4	Propriedades das Misturas Asfálticas _____	112

4.4.1	Sensibilidade ao Escorrimento _____	112
4.4.2	Resistência à Tração por Compressão Diametral _____	113
4.4.3	Estabilidade Marshall _____	115
4.4.4	Dano por Umidade Induzida (<i>LOTTMAN</i> Modificado) _____	116
4.4.5	Cântabro _____	118
4.4.6	Módulo de Resiliência (MR) _____	119
4.4.7	Fadiga por Compressão Diametral à Tensão Controlada _____	122
4.4.8	Módulo Dinâmico ($ E^* $) _____	130
4.4.9	<i>Flow Number</i> (Resistência à Deformação Permanente) _____	140
CAPÍTULO 5 _____		143
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES _____	143
5.1	Considerações Finais _____	143
5.2	Conclusões _____	144
5.3	Sugestões para Pesquisas Futuras _____	145
REFERÊNCIAS _____		146
ANEXOS _____		159

1 INTRODUÇÃO

Os agregados respondem por cerca de 95% do volume total das misturas asfálticas, o que faz com que a granulometria seja um dos fatores que influencia no desempenho das misturas em campo. Os agregados são considerados o esqueleto da mistura asfáltica e, conseqüentemente, são os responsáveis por resistir a maior parte da carga imposta ao pavimento, sendo por isso importante que sejam observadas suas características e propriedades.

Misturas asfálticas compostas por granulometrias mal selecionadas têm potencial para desenvolver falhas, como a deformação permanente precoce, reduzindo a vida útil do pavimento e gerando gastos, antes do previsto, com reabilitação. Embora existam estudos como o de Pazos (2015) e Silva *et al.* (2015) que comprovam a importância da adequada seleção granulométrica dos agregados para pavimentação; no Brasil, geralmente, as curvas granulométricas das misturas asfálticas são determinadas de forma empírica, por métodos de tentativa e erro, a fim de atender às especificações do órgão regulador brasileiro, o Departamento Nacional de Infraestrutura de transportes (DNIT).

De acordo com Silva *et al.* (2015), em geral, adotam-se porcentagens de agregados típicas que foram desenvolvidas a partir de experiências práticas. Por isso, verifica-se uma repetição das falhas como deformação permanente nas trilhas de roda e trincamento por fadiga, tendo em vista que há uma disseminação dos erros de projeto.

Aragão *et al.* (2016) afirmam que, considerando a relevância dos agregados e os efeitos correspondentes às suas propriedades sobre o comportamento geral das misturas asfálticas e sobre os custos relacionados com a produção e manutenção de pavimentos flexíveis, o estudo de metodologias que sejam capazes de caracterizar as propriedades dos agregados de forma objetiva e representativa torna-se uma tarefa importante.

Dessa forma, avaliar os efeitos das propriedades das partículas de agregados sobre o comportamento mecânico global de misturas asfálticas, e buscar métodos de escolha granulométrica que proporcionem a escolha adequada das faixas de agregados, são formas

de melhorar o desempenho dos pavimentos, proporcionando maior resistência e durabilidade.

Os métodos Bailey, Francês e o das Faixas de Agregados Dominantes (FAD) podem ser utilizados como ferramentas úteis para realização de análise e seleção sistemática de granulometrias que visem proporcionar um melhor desempenho das misturas asfálticas, pois procuram determinar parâmetros da estrutura dos agregados e procedimentos de seleção e avaliação de granulometrias. Associar a escolha de uma morfologia adequada ao uso das metodologias de escolha granulométrica adequadas, como o método Bailey, o método Francês e a avaliação FAD, pode trazer grandes benefícios para a determinação de uma mistura asfáltica adequada às necessidades de cada projeto.

A metodologia Bailey se baseia no arranjo das partículas a fim de formar uma matriz de agregados resistente por meio do intertravamento máximo obtido pela distribuição das partículas por tamanho. Por outro lado, o método Francês realiza a seleção da mistura com base no desempenho da mesma; em sua formulação, o método seleciona os materiais de acordo com o propósito a ser atendido, e o esqueleto pétreo é selecionado a partir de curvas de partida para cada tipo de mistura. Enquanto que a metodologia FAD propõe identificar as peneiras de agregados que interagem e podem contribuir para formação de um esqueleto pétreo resistente.

Embora no Brasil a maioria dos agregados utilizados para pavimentação asfáltica seja de origem granítica, verifica-se que em algumas regiões, como na região norte, por exemplo, há dificuldade de se obter agregados desta natureza, aumentando assim os custos e dificultando a execução dos projetos.

Algumas pesquisas como a de Oliveira *et al.* (2011) explicam que na região norte, assim como em países de clima tropical, há abundância de rochas lateríticas que podem ser britadas e utilizadas em sua forma particulada como agregado em substituição ao agregado granítico. Trigo (2012), Borré *et al.* (2013), Amaral (2004) e Moizinho (2007) estudaram, respectivamente, a utilização da laterita em substituição aos materiais tradicionalmente utilizados em obras de concreto, base de pavimentos e revestimento asfálticos. Em suas pesquisas os autores observaram resultados positivos quanto à resistência e trabalhabilidade que devem considerados para exploração da utilização da laterita.

Nesta pesquisa foram avaliadas se as características dos agregados (desde a granulometria até características mais específicas de forma e textura) e os métodos de seleção granulométrica (métodos DNIT, Bailey e Francês, bem como a avaliação pelo método FAD) influenciam no desempenho mecânico de misturas asfálticas compostas por agregados graníticos e lateríticos.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência das características morfológicas e da escolha de faixas granulométricas dos agregados graníticos e lateríticos, na resistência das misturas asfálticas, utilizando os métodos DNIT, Bailey e Francês, e a avaliação FAD.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa envolvem:

- avaliar a influência da morfologia dos agregados na resistência das misturas asfálticas;
- estudar a eficiência dos métodos DNIT, Bailey e Francês de seleção granulométrica;
- verificar a aplicabilidade do método da Faixa de Agregados Dominantes (FAD);
- avaliar a utilização de agregados lateríticos nas frações graúda e miúda, enquadrados na média das faixas granulométricas selecionadas;
- verificar se o tipo do agregado influencia na escolha do método de seleção granulométrica utilizado.

1.2 Organização do Trabalho

Esta dissertação encontra-se organizada conforme descrição dos tópicos subsequentes:

- *capítulo 1*: abrange a introdução da pesquisa, explicitando a justificativa e a necessidade de abordar o assunto; apresenta os objetivos (geral e específicos) que foram traçados para o estudo, bem como esse tópico que descreve a organização da dissertação;
- *capítulo 2*: aborda uma revisão de literatura na qual são pontuados os assuntos relevantes ao desenvolvimento e entendimento deste trabalho;
- *capítulo 3*: apresenta os materiais e metodologias utilizadas para o desenvolvimento desta pesquisa, bem como todas as especificações que foram seguidas;
- *capítulo 4*: expõe os resultados obtidos durante o programa experimental da pesquisa, bem como a análise e avaliação segundo os parâmetros normativos e da literatura atual;
- *capítulo 5*: trata das conclusões e constatações obtidas a partir dos resultados e análises. Dispõe ainda de sugestões para trabalhos futuros;
- ao final estão inseridas as referências utilizadas para fundamentar a pesquisa, bem como os anexos que apresentam detalhes da pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo trata da revisão da literatura, reunindo informações, coletadas em publicações nacionais e internacionais acerca dos temas analisados. Neste capítulo são apresentados os tópicos acerca da morfologia dos agregados e os métodos de avaliação deste parâmetro, bem como a influência deste nas misturas asfálticas. Também são abordados os aspectos da distribuição granulométrica das misturas asfálticas e, ainda, os métodos de seleção granulométrica, dando ênfase aos métodos DNIT, Bailey, Francês e da Faixa de Agregados Dominante (FAD), e sua aplicabilidade para avaliação das faixas granulométricas de misturas asfálticas. Em seguida é feita uma breve análise da pavimentação no Brasil e o uso de materiais alternativos, considerando o uso da laterita como material alternativo e, ainda, a sua aplicação em misturas asfálticas.

2.1 Morfologia dos Agregados

De acordo com a norma ABNT NBR 9935/2005, que determina a terminologia dos agregados, o termo agregado é definido como material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para produção de argamassas e de concreto.

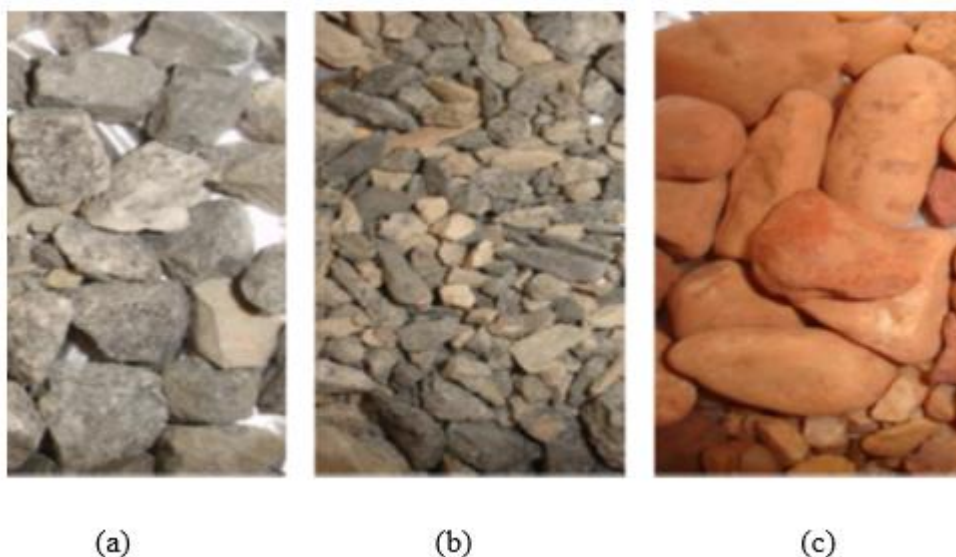
No entanto, os agregados são utilizados não apenas para esta finalidade. Em misturas asfálticas, eles são aplicados e desenvolvem importante papel na resistência e durabilidade das misturas. Dessa forma a escolha adequada dos agregados, para produção de misturas asfálticas, deve considerar as suas características, desde sua origem até a quantificação na dosagem. Estudos, como o de Pazos (2015), apontam que as características morfológicas, dentre todas dos agregados, são as que devem receber uma atenção especial quando esses são aplicados na pavimentação.

As características morfológicas de partículas de agregados podem ser definidas em função de três propriedades principais, a saber: forma, angularidade e textura superficial (MASAD *et al.*, 2001; SUKHWANI *et al.*, 2006; KIM e SOUZA, 2009; BESSA *et al.*, 2009, 2011). Essas características afetam, entre outras propriedades, a trabalhabilidade, o ângulo

de atrito e a energia de compactação necessária para atingir a densidade desejada da mistura asfáltica (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Segundo Pazos (2015) de acordo com as características de forma e angularidade, as partículas de agregados usadas em obras de pavimentação podem ser classificadas como cúbicas, lamelares (achatadas e alongadas) ou arredondadas (Figura 1).

Figura 1 - Forma (a) cúbica, (b) lamelar e (c) arredondada das partículas de agregados.



Fonte: ARAGÃO *et al.* (2016).

A presença de partículas arredondadas e achatadas na mistura asfáltica é indesejada tendo em vista que elas tendem a quebrar facilmente, durante a execução do pavimento ou quando submetidas à aplicação de cargas. Estudos como o de Pazos (2015) mostram que esses tipos de partículas são menos resistentes a fraturas durante a compactação, e seu uso tende a aumentar o volume de vazios no agregado mineral.

Pazos (2015) explica que a angularidade pode ser definida como a medida da agudeza dos cantos de uma partícula, sendo uma partícula arredondada classificada como aquela que tem baixa angularidade; e uma partícula não arredondada, cúbica, por exemplo, aquela que tem alta angularidade.

A angularidade das partículas dos agregados influencia diretamente a estabilidade e a trabalhabilidade das misturas asfálticas. Partículas mais angulares geralmente apresentam melhor intertravamento entre si, o que aumenta a resistência das misturas ao acúmulo de

deformações permanentes (KANDHAL e PARKER, 1998; GOUVEIA e FERNANDES, 2006; WHITE *et al.*, 2006).

A angularidade de partículas é geralmente medida tanto para o agregado graúdo (*coarse aggregate angularity, CAA*) quanto para o agregado miúdo (*fine aggregate angularity, FAA*). Deve-se observar que as medidas de angularidade, para ambas as frações, são obtidas indiretamente a partir da sua correlação com outras características das amostras de agregados testadas. Além disso, pesquisadores têm sugerido que tais ensaios não quantificam exclusivamente o efeito da angularidade (WHITE *et al.*, 2006), mas sim uma combinação do efeito da angularidade, textura e forma do agregado.

A textura superficial é tão importante quanto à forma e a angularidade, e tem sido identificada como característica significativa das partículas de agregados, já que exerce influência na trabalhabilidade, na adesividade, na resistência ao atrito e no cisalhamento das misturas asfálticas. De acordo com Pazos (2015), à medida que a textura dos agregados é aumentada, há uma tendência de redução da trabalhabilidade e de crescimento da resistência ao cisalhamento das misturas e do teor de projeto de ligante asfáltico.

Resultados de diversos estudos também têm demonstrado que misturas contendo agregados com menor perda de textura, após testes de abrasão, apresentam maior resistência ao escorregamento, o que se traduz em um incremento de segurança para o usuário da rodovia (ROBERTS *et al.* 1996; MAHMOUD, 2005; MASAD *et al.*, 2006; MASAD *et al.*, 2009; MATTOS, 2009; BESSA *et al.*, 2012; RODRIGUES, 2013; RODRIGUES *et al.*, 2014).

Embora a textura superficial tenha sua importância reconhecida, ainda não há um método convencional para quantificar essa propriedade, a não ser a partir de avaliações indiretas visuais ou táteis que são extremamente influenciadas pelo operador. Neste contexto, há no mercado uma promissora alternativa, o sistema *AIMS2*, que quantifica a textura superficial das partículas.

Dada a importância da morfologia dos agregados para aplicação desses na pavimentação, torna-se de fundamental importância a realização de ensaios e procedimentos que avaliem e qualifiquem essas propriedades do material em estudo.

2.1.1 Métodos de Avaliação da Morfologia

Para produção de misturas asfálticas adequadas, os agregados selecionados devem atender aos critérios de dureza, resistência, durabilidade, distribuição de tamanhos de partículas (granulometria) apropriada, forma preferencialmente cúbica e baixa porosidade. Geralmente essas propriedades são determinadas a partir de testes em laboratório realizados seguindo recomendações normativas.

Em 1987, com o intuito de melhorar o desempenho, a eficiência e a segurança de misturas asfálticas, o congresso americano propôs a formação do Strategic Highway Research Program (*SHRP*), que foi pensado e aprimorado durante 5 anos e teve como produto final o chamado *Superior Performing Asphalt Pavements* (*SUPERPAVE*). O sistema *SUPERPAVE* inclui avanços significativos em procedimentos de ensaios para a classificação de ligantes e para a dosagem de misturas asfálticas. Além disso, o sistema também define as chamadas propriedades de consenso e de origem de agregados.

As quatro propriedades de consenso selecionadas pelos pesquisadores do *SHRP* são consideradas fundamentais para o bom desempenho dos revestimentos asfálticos e incluem: angularidade do agregado graúdo, angularidade do agregado miúdo, partículas achatadas e alongadas e teor de argila (GOUVEIA e FERNANDES JR, 2006; BERNUCCI *et al.*, 2010). Os critérios estabelecidos para tais propriedades variam principalmente com o volume de tráfego. A caracterização das propriedades de origem é considerada opcional e os correspondentes critérios especificados para tais propriedades são estabelecidos localmente pelas agências rodoviárias, de acordo com características geológicas da região. As propriedades de origem incluem: resistência à abrasão, sanidade e presença de materiais deletérios.

2.1.1.1 Angularidade de Agregados Graúdos

A metodologia *SUPERPAVE* recomenda os procedimentos da norma *ASTM D5821* para a determinação do *CAA* (Angularidade de Agregados Graúdos). Esse é um ensaio subjetivo e muito dependente da habilidade do operador, já que requer que esse avalie se o agregado tem nenhuma, uma ou várias faces fraturadas. O ensaio está baseado na quantificação do percentual de agregados com faces fraturadas e não recomenda a

caracterização da agudeza dos cantos dessas faces fraturadas. As faces fraturadas são quantificadas como ilustrado na Figura 2, que apresenta agregados com uma face fraturada, duas faces fraturadas ou nenhuma face fraturada. Conforme ilustrado, quanto maior o número de faces fraturadas menos arredondado será o agregado, o que pode indicar melhoria no intertravamento, por exemplo.

Figura 2 - Ensaio de porcentagem de partículas fraturadas



Fonte: GOUVEIA e FERNANDES JR, 2006

2.1.1.2 Angularidade de Agregados Miúdos

O ensaio de angularidade do agregado miúdo determina a porcentagem dos vazios não compactados contidos entre as partículas de agregados, quando essas são vertidas de uma altura de queda dentro de um cilindro de volume conhecido.

De acordo com Pazos (2015), a norma *AASHTO* T304, adotada pela metodologia *SUPERPAVE* para a determinação do *FAA* (Angularidade de Agregados Miúdos), procura garantir que o atrito interno e conseqüente intertravamento entre as partículas sejam adequados para gerar misturas asfálticas resistentes ao acúmulo de deformações permanentes. Uma premissa do ensaio é a de que partículas que são mais angulares e que têm textura mais rugosa terão um maior volume de vazios entre elas e um melhor intertravamento, resultando em misturas mais estáveis.

2.1.1.3 Partículas Achatadas e Alongadas

Partículas achatadas e alongadas (*F&E*) são consideradas indesejáveis para misturas asfálticas devido à tendência de quebra durante o processo construtivo e sob a ação do tráfego. No método *SUPERPAVE*, as partículas *F&E* são caracterizadas seguindo

procedimentos recomendados pela norma *ASTM D4791*. O resultado do ensaio é dado com base no percentual de partículas que têm a razão entre a maior e a menor dimensões maior do que 5. Atualmente, a especificação SUPERPAVE limita o valor deste percentual a 10% do total de partículas (BUCHANAN, 2000; BERNUCCI *et al.*, 2010; FHWA, 2013). Atentar para este parâmetro torna-se importante uma vez que partículas muito achatadas não proporcionam um intertravamento adequado e, conseqüentemente, apresentam menor resistência.

2.1.1.4 Textura Superficial

Apesar da textura superficial não ser propriedade da metodologia SUPERPAVE, ela é reconhecida como característica que exerce influência significativa no desempenho de misturas asfálticas, já que tem relação direta com as propriedades de atrito. O uso de agregados com textura mais rugosa pode gerar misturas mais resistentes ao acúmulo de deformações permanentes, uma vez que apresentam maior atrito entre as partículas, evitando que haja ruptura da mistura.

Como alternativa para a quantificação de características relacionadas à textura, alguns autores, como Pazos (2015), têm explorado uma metodologia baseada em resultados do sistema *AIMS 2*, que é um sistema de processamento digital de imagens.

2.1.1.5 Caracterização da morfologia de agregados a Partir do Processamento Digital de Imagens

As propriedades de forma e textura superficial de agregados exercem grande influência no comportamento mecânico de misturas asfálticas. No entanto, os procedimentos utilizados para caracterização dessas propriedades apresentam certo grau de subjetividade que geram resultados pouco representativos.

De acordo com Pazos (2015), na busca por metodologias mais expeditas e confiáveis para caracterizar propriedades geométricas e de textura superficial de agregados, pesquisadores como Masad *et al.* (2007) têm explorado procedimentos baseados em sistemas de análise por imagem. Souza *et al.* (2012) citaram alguns métodos baseados em

processamento de imagens, tais como: VDG-40 Videograder, Computer Particle Analyzer, Micromeritics OptiSizer PSDA, VideoImaging System (VIS), Buffalo Wire Works PSSDA, Camsizer, Wipshape, University of Illinois Aggregate Image Analyzer (UIAIA) e Aggregate Imaging Measurement System (AIMS).

Masad *et al.* (2007) apresentaram comparações entre esses métodos e observaram que o sistema AIMS se destaca como metodologia promissora, pois é capaz de caracterizar propriedades de forma, angularidade e textura superficial de agregados a partir de análises de imagens bidimensionais ou tridimensionais das partículas de agregados.

Pazos (2015) relata que a versão original do AIMS utilizava um sistema de pódio x-y-z para o posicionamento dos agregados, cujas imagens eram posteriormente capturadas. Tal configuração era demorada e de difícil alinhamento das partículas. Para superar essa limitação do sistema, uma configuração de plataforma giratória foi selecionada para o AIMS 2, versão mais moderna do equipamento.

O AIMS 2 tem sido encarado pela comunidade de pesquisa em pavimentação asfáltica como uma boa alternativa para a caracterização de propriedades morfológicas, tanto de agregados finos quanto de agregados graúdos. O sistema conta com uma câmera e usa um mecanismo para capturar imagens em diferentes resoluções, ajustadas de acordo com o tamanho das partículas avaliadas. Pode ser usado para caracterizar forma de agregados medindo entre 0,075 mm (peneira #200) e 25 mm (peneira 1") (PINE INSTRUMENT, 2013).

O equipamento também apresenta análise detalhada da textura superficial das partículas e pode ser usado para caracterizar agregados provenientes de testes de resistência à desintegração, tais como o Micro-Deval e o ensaio de abrasão Los Angeles (Alves, 2014). A mudança de propriedades avaliadas pelo AIMS 2 antes e depois dos testes de degradação revela a habilidade do agregado de prover boa resistência à derrapagem aos usuários dos pavimentos. O sistema AIMS 2 emprega métodos baseados em conceitos científicos para realizar análises de forma, angularidade e textura, com boa repetibilidade e reprodutibilidade dos resultados (MASAD *et al.*, 2005, 2007; BESSA *et al.*, 2009, 2012).

2.2 Distribuição Granulométrica de Misturas Asfálticas

A distribuição das partículas por tamanhos, expressa em função da porcentagem em peso ou volume da mistura, é conhecida como graduação da mistura. A graduação em peso geralmente é mais utilizada por ser mais prática de executar. A graduação por volume pode ser considerada aproximadamente igual à graduação por peso se as massas específicas dos agregados usados forem aproximadamente iguais.

O desempenho de uma mistura asfáltica está intimamente relacionado com a escolha da sua graduação. Essa escolha afeta propriedades importantes como a estabilidade, a durabilidade, a permeabilidade, a trabalhabilidade, a resistência ao dano por fadiga, a resistência às deformações permanentes e, também, a resistência ao dano causado por umidade. Dessa forma, a graduação de uma mistura asfáltica deve ser pensada como o primeiro passo para sua elaboração.

A análise das porcentagens de agregados, retidas e/ou passantes em um conjunto de peneiras, que variam de acordo com a norma ou especificação usada, determina a distribuição granulométrica de um material. A graduação pode ser representada graficamente por uma curva granulométrica, onde a ordenada, numa escala aritmética, indica a porcentagem total passante, em peso, em uma determinada peneira, enquanto a abscissa representa o tamanho das peneiras expressas em uma escala logarítmica ou elevadas à potência 0,45.

Em meio aos vários tipos de graduação mais usuais para misturas asfálticas, de acordo com Bernucci *et al.* (2010), vale destacar três tipos principais:

- misturas de graduação densa: apresentam uma curva granulométrica contínua e bem graduada, de forma a proporcionar um esqueleto mineral com poucos vazios, visto que os agregados com dimensões menores preenchem os vazios dos agregados de dimensões maiores. Ex.: Cimento Asfáltico (CA).
- misturas de graduação aberta: cuja curva granulométrica é uniforme com agregados quase que exclusivamente do mesmo tamanho de forma a proporcionar um esqueleto mineral com muitos vazios interconectados. Possui insuficiência de material fino (menor que 0,075mm) para preencher os vazios entre as partículas menores, com o objetivo de tornar a mistura com elevado volume de vazios com ar e, portanto,

drenante, possibilitando a percolação de água no interior da mistura asfáltica. Ex.: mistura asfáltica drenante, conhecida no Brasil por camada porosa de atrito (CPA).

- misturas de graduação descontínua: a curva granulométrica apresenta proporcionalidade dos grãos de maiores dimensões em quantidade dominante em relação aos grãos de dimensões intermediárias, completados por certa quantidade de finos, de forma a ter uma curva descontínua em certas peneiras, com o objetivo de tornar o esqueleto mineral mais resistente à deformação permanente, com o maior número de contatos entre os agregados graúdos. Ex.: matriz pétreo asfáltica (stone matrix asphalt – SMA); mistura sem agregados de certa graduação (gap-graded).

2.3 Seleção Granulométrica de Misturas Asfálticas

Uma mistura asfáltica, em seu período de vida útil, deve apresentar resistência aos esforços a ela impostos pelo uso. O crescente volume de tráfego, o aumento das cargas impostas e do número de eixos dos veículos, além do uso de materiais selecionados, em muitas situações, inadequadamente, aparece como causa de danos e deformações precoces do pavimento.

Tendo em vista que os agregados são os principais responsáveis por resistir aos esforços impostos ao pavimento, é de fundamental importância que esses sejam selecionados de forma adequada e racional. De acordo com Nascimento (2008), o desempenho dos revestimentos, quando solicitados pelo tráfego ou pelas condições climáticas, depende das propriedades e da proporção de cada um dos seus materiais constituintes, ou seja, ligante asfáltico e agregados.

O esqueleto pétreo, formado pelos agregados, é tido como principal responsável pelo desempenho mecânico de misturas asfálticas e pela sua resistência aos diferentes tipos de danos, tais como o acúmulo de deformações permanentes e a fratura por fadiga. Os agregados geralmente são selecionados de acordo com a disponibilidade e a distância de transporte entre a jazida mineral e o local da obra, por isso, em muitas situações, agregados com forma não tão desejável, tais como seixos rolados arredondados, são usados, já que o custo de obtenção de agregados mais adequados poderia inviabilizar as obras.

Pesquisas como as de Aragão *et al.* (2016), Pazos (2015) e Ferreira *et al.* (2015) têm sido feitas a fim de comprovar que o uso de agregados que possuem um intertravamento e uma morfologia adequados proporcionam uma melhora significativa na resistência das misturas asfálticas, fazendo com que haja expressiva redução no aparecimento de falhas e defeitos

O conhecimento das características morfológicas dos agregados, das faixas granulométricas adequadas e da sua correlação com o desempenho mecânico de misturas pode permitir o uso de partículas com formatos menos desejáveis, especialmente em vias de volume de tráfego não tão intenso e em locais em que agregados mais cúbicos não estão disponíveis, e em que o seu custo de transporte pode inviabilizar as obras de pavimentação asfáltica. Nesse contexto, faz-se necessária a especificação de procedimentos de caracterização de propriedades e de especificação de faixas granulométricas que gerem resultados representativos e bem correlacionados com o desempenho de misturas no campo. O uso de técnicas de caracterização morfológicas e de metodologias de dosagem granulométrica, como o método Bailey, o método Francês e o método FAD, surgem como alternativa para o uso mais adequado de agregados nas misturas asfálticas, proporcionando a obtenção de misturas com melhores características.

2.3.1 Método do DNIT

No Brasil, o órgão responsável pela regulamentação, fiscalização e avaliação dos pavimentos é o DNIT, dessa forma, métodos de seleção granulométrica propostos por suas normativas são os mais aplicados nos pavimentos brasileiros, métodos esses que consideram fatores como a granulometria e a absorção dos agregados utilizados.

Neste método são utilizados procedimentos generalistas e relativamente simples que fornecem uma faixa granulométrica e o teor de ligante a ser utilizado após avaliar algumas características dos agregados a serem empregados.

De acordo com Bernucci *et al.* (2010), primeiramente devem ser feitas as determinações das massas específicas dos materiais constituintes da mistura, bem como a determinação da granulometria dos agregados a serem utilizados; em seguida deve ser feita a escolha da faixa granulométrica, que é realizada de acordo com faixas pré-determinadas

pelo DNIT, na qual devem ser enquadrados os quantitativos de materiais de acordo com a necessidade do projeto. Após a escolha da faixa granulométrica, determina-se o teor de ligante adequado.

A norma DNIT 031/2006 – ES estabelece faixas granulométricas para aplicação em misturas asfálticas, de acordo com as especificações de projeto e considerando a granulometria a ser utilizada e o tipo de camada a ser executada. Na Tabela 1 estão apresentadas as faixas estabelecidas pela norma.

Tabela 1 - Faixas granulométricas e requisitos para Concreto Asfáltico (DNIT 031/2006 – ES).

Peneira de Malha Quadrada		FAIXAS			
		Porcentagem em massa passando			
Série ASTM	Abertura [mm]	A	B	C	Tolerância
2”	50,8	100	-	-	-
1 1/2”	38,1	95-100	100	-	± 7%
1”	25,4	75-100	95-100	-	± 7%
3/4”	19,1	60-90	80-100	100	± 7%
1/2”	12,7	-	-	80-100	± 7%
3/8”	9,5	35-65	45-80	70-90	± 7%
Nº 4	4,8	25-50	28-60	44-72	± 5%
Nº 10	2,0	20-40	20-45	22-50	± 5%
Nº 40	0,42	10-30	10-32	8-26	± 5%
Nº 80	0,18	5-20	8-20	4-16	± 5%
Nº 200	0,075	1-8	3-8	2-10	± 2%
Teor de Asfalto %		4,0 a 7,0	4,5 a 7,5	4,5 a 9,0	± 0,3%
Tipo de Camada de Revestimento Asfáltico		Camada de Ligação	Camada de Ligação ou Rolamento	Camada de Rolamento	-

Fonte: DNIT 031/2006 – ES.

Bernucci *et al.* (2010) explicam ainda que após a seleção da faixa granulométrica, adequada ao tipo de agregado que está sendo utilizado, deve ser realizada a escolha da composição granulométrica dos agregados, de forma que seja possível enquadrar a mistura nos limites da faixa escolhida. Ou seja, é escolhido o percentual em massa de cada agregado para compor a mistura.

A porcentagem alvo na faixa de projeto corresponde à composição de agregados escolhida, podendo em campo variar entre um mínimo e um máximo de acordo com a especificação. Deve-se observar que a porcentagem alvo deve estar enquadrada na faixa selecionada.

2.3.2 Método Bailey

O Método Bailey de seleção granulométrica tenta unir os benefícios das misturas densas com os das misturas descontínuas. O método utiliza a distribuição granulométrica dos agregados e suas respectivas massas específicas (massa específica solta e compactada) e massas unitárias, que fornecem as características de compactação de cada fração de agregado em uma mistura. O Método Bailey faz a seleção da distribuição granulométrica ideal, assegurando a resistência à deformação permanente pelo intertravamento dos agregados graúdos e a resistência ao desgaste pelo maior teor de ligante, devido ao adequado volume de vazios (VAVRIK *et al.*, 2002).

Desenvolvido inicialmente pelo engenheiro Robert Bailey, do Departamento de Transporte de Illinois (IDOT), o Método Bailey de seleção de agregados para uso em pavimentos asfálticos vem sendo usado e aprimorado desde 1980. O método Bailey baseia-se no intertravamento e empacotamento dos agregados, e tem o propósito de determinar a melhor composição granulométrica para a mistura asfáltica de modo a atingir os requisitos volumétricos de dosagem e resultar em adequadas características de compactação (VAVRIK, 2000).

Esse método tem por objetivo combinar os agregados, possibilitando, quando desejado, seu intertravamento e transformando-os no esqueleto da estrutura, além de utilizar uma graduação contínua e balanceada, completando a mistura (VAVRIK *et al.*, 2002).

De acordo com Mendes (2011), os dois princípios básicos utilizados pelo método de Bailey são o arranjo de agregados e a definição de agregados graúdos e miúdos, que se diferencia das definições utilizadas normalmente. Inicialmente, seleciona-se o grau de intertravamento dos agregados que torna a mistura capaz de resistir à deformação permanente. Para garantir que a quantidade de ligante asfáltico seja suficiente, modifica-se a quantidade de agregados graúdos e miúdos, alterando os Vazios no Agregado Mineral (VAM).

A distinção entre agregados graúdos e miúdos é função do TMN (Tamanho Máximo Nominal) da composição granulométrica e definida a partir das chamadas peneiras de controle, denominadas Peneiras de Controle Primário, Secundário e Terciário (PCP, PCS e PCT, respectivamente), além da Peneira Média (PM), conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Peneiras de controle de acordo com o Método Bailey

Tamanho Máximo Nominal (TMN) [mm]	37,50	25,00	19,00	12,50	9,50	4,75
Peneira Média (PM) [mm]	19,00	12,50	9,50	6,25	4,75	2,36
Peneira de Controle Primário (PCP) [mm]	9,50	4,75	4,75	2,36	2,36	1,18
Peneira de Controle Secundário (PCS) [mm]	2,36	1,18	1,18	0,60	0,60	0,30
Peneira de Controle Terciário (PCT) [mm]	0,60	0,30	0,30	0,15	0,15	0,075

Fonte: FERREIRA *et al.* (2015).

No método Bailey, todo o material retido na PCP é considerado graúdo. Por outro lado, o material passante na PCP e retido na PCS é considerado fração graúda do agregado miúdo e, conseqüentemente, o material passante na PCS é considerado fração miúda do agregado miúdo, esta última fração é avaliada pela PCT. A PM é utilizada para avaliação do agregado graúdo. Destaca-se que quando o percentual passante na PCP é inferior a 50%, considera-se que o comportamento da mistura asfáltica é governado pelos agregados graúdos, caso contrário, os agregados miúdos é que controlam o seu comportamento. (FERREIRA *et al.*, 2015).

Parâmetros de proporção, como proporção de Agregados Graúdos (AG), proporção Graúda do Agregado Miúdo (GAM) e proporção Fina do Agregado Miúdo (FAM) são utilizados para realizar a análise da estrutura granulométrica. Esses parâmetros são determinados a partir das peneiras de controle. A Tabela 3 resume os valores recomendados para os parâmetros de proporção. Espera-se que composições granulométricas que respeitem

esses parâmetros sejam resistentes à deformação permanente, possuindo elevada estabilidade e boa durabilidade.

Tabela 3 - Parâmetros de Proporção utilizados no Método Bailey.

Parâmetro	Expressão de Cálculo	Intervalo Recomendado
AG	(PM-PCP) / (100-PM)	0,50-0,65 (TMN de 12,5 mm)
		0,60-0,75 (TMN de 19,0 mm)
GAM	PCS/PCP	0,35-0,50
FAM	PCT/PCS	0,35-0,50

Fonte: FERREIRA *et al.* (2015).

Saliente-se que os valores apresentados nas Tabelas 2 e 3 referem-se às misturas asfálticas com comportamento governado pelos agregados graúdos. Para as misturas em que predominam os agregados miúdos, considera-se o percentual passante na PCP como sendo o total da mistura de agregados. Diante disso, são definidas novas peneiras de controle e novos parâmetros de proporção. Essas novas considerações, assim como uma abordagem mais completa do método Bailey, podem ser encontradas em Vavrik (2000) e Vavrik *et al.* (2002).

As misturas resultantes de um processo de seleção granulométrica, como no Método Bailey, segundo Vavrik *et al.* (2002) e Cunha *et al.* (2004) tendem a ser mais estáveis e possuem um VAM compatível com uma boa durabilidade.

2.3.2.1 Definição de Agregados Graúdo e Fino

Na pavimentação, agregado graúdo é definido como toda partícula que fica retida na peneira 4,75mm, sendo aquelas que passam por essa peneira consideradas como agregados miúdos, não importando qual seja o TMN da mistura.

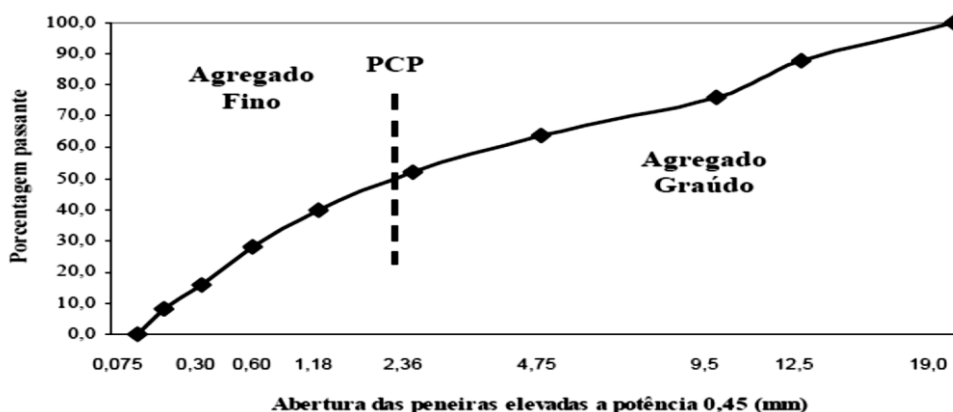
De acordo com Cunha (2004), no Método Bailey a definição de agregado graúdo e fino é mais específica, de modo a determinar a compactação e o intertravamento do agregado por meio da combinação de agregados de vários tamanhos. De acordo com a definição do Método Bailey são considerados agregados graúdos as partículas que, acondicionadas em um certo volume, criam vazios que podem ser preenchidos por agregados de menor tamanho. Assim sendo, todas as partículas que preenchem os vazios deixados pelo agregado graúdo

são considerados agregados finos. Com essa definição, é necessário mais do que uma peneira de controle para a divisão entre agregado graúdo e fino, e essas peneiras vão depender do TMN da mistura. O TMN é definido, segundo a especificação SUPERPAVE, como a primeira peneira acima da peneira que retém mais que 10% de material.

Observando esta definição de grãos e finos do Método Bailey, tem-se que a consideração de partícula graúda ou fina vai depender do esqueleto pétreo em estudo. Em uma mistura com TMN 37,5mm, por exemplo, as partículas de 9,5mm são consideradas agregado fino, pois preenchem os vazios deixados pelas partículas de 37,5mm, enquanto que em uma mistura com TMN 12,5mm, as partículas com 9,5mm de diâmetro são consideradas agregado graúdo.

Para poder diferenciar os agregados graúdos e finos, o método Bailey utiliza a Peneira de Controle Primário (PCP), que se baseia no tamanho máximo nominal da mistura (TMN) como ilustra a Figura 3.

Figura 3 - Exemplo de divisão entre agregado graúdo e fino em uma mistura com TMN 19,00 mm.



Fonte: VAVRIK *et al.* (2002)

A PCP é considerada como sendo a peneira com o diâmetro de abertura mais próximo do resultado da Equação 1.

$$PCP = TMN \times 0,22 \quad (eq.1)$$

Onde:

PCP: Peneira de Controle Primário

TMN: Tamanho Máximo Nominal

A análise em duas (2D) e três dimensões (3D) do arranjo de agregados de diferentes formas permite encontrar fatores entre 0,18 e 0,28 que poderiam ser utilizados na Equação 1, sem afetar a análise da granulometria. No entanto, padronizou-se o valor de 0,22 (VAVRIK *et al.*, 2002).

2.3.2.2 Combinação dos Agregados por Volume

As misturas asfálticas utilizadas na pavimentação contêm vazios que são oriundos da compactação e das características de arranjo da mistura. Na composição granulométrica é importante quantificar os vazios deixados pelo agregado graúdo e tentar preenchê-los com quantidade adequada de agregado fino.

Em geral, os métodos de dosagem de misturas asfálticas se baseiam em fatores volumétricos. No entanto, a fim de simplificar o processo, os agregados na maioria das vezes acabam sendo combinados por peso. Apenas em casos mais específicos, quando os agregados apresentam diferenças significativas nos valores de massa específica, a correção da porcentagem passante em peso é realizada pela porcentagem passante em volume.

No método Bailey, para cada agregado graúdo e para cada agregado fino, são determinados parâmetros que representam a forma que os agregados se arranjam estruturalmente. Eles são necessários para a avaliação das propriedades de intertravamento dos agregados.

Para avaliar o intertravamento das misturas é necessário conhecer os dados volumétricos da estrutura de vazios. Para isso é necessário determinar as massas específicas solta e compactada de cada agregado graúdo utilizado e a massa específica compactada de cada agregado fino empregado na mistura (VAVRIK *et al.*, 2002).

2.3.2.3 Massa Específica Escolhida do Agregado Graúdo

No método Bailey é necessário escolher o grau de intertravamento do agregado graúdo desejado para mistura, esse valor é chamado de massa específica escolhida do

agregado graúdo. A utilização deste valor permite determinar o volume de agregado graúdo da mistura e seu grau de intertravamento.

Segundo Cunha (2004), para o Método Bailey, uma mistura que apresenta o esqueleto pétreo formado por agregados graúdos é definida como de graduação graúda. Uma mistura de graduação fina não possui uma quantidade suficiente de agregado graúdo para formar um esqueleto, sendo assim, as cargas aplicadas são suportadas pela estrutura de agregado fino. O valor da massa específica escolhida tem relação com o tipo de mistura desejada (Figura 4).

Figura 4 - Esquema do método de seleção da massa específica escolhida para os agregados graúdos.



Fonte: VAVRIK *et al.* (2002)

Ainda de acordo com Cunha (2004), a massa específica solta está relacionada com um mínimo do intertravamento do agregado graúdo. Teoricamente, este valor é a divisão entre uma mistura de graduação fina e outra de graduação graúda.

Ao selecionar uma massa específica escolhida menor que a massa específica solta, as partículas de agregado graúdo ficam espalhadas e não formam uma condição uniforme de contato entre partículas. Desse modo, a mistura tem um esqueleto de agregado fino e, conseqüentemente, as propriedades da mistura ficam relacionadas com as características dos agregados finos.

Por sua vez, a massa específica compactada é considerada, para misturas de graduação densa, como sendo o máximo do intertravamento do agregado graúdo. Esse valor é adotado geralmente como sendo 110% da massa específica solta. Não é aconselhável usar

valores de massa específica escolhida próximos dos de massa específica compactada, pois pode dificultar a compactação da mistura asfáltica no campo devido à necessidade de maior esforço de compactação para atingir a densidade desejada.

Em misturas de graduação densa, a massa específica escolhida é determinada como uma porcentagem da massa específica solta do agregado graúdo. Quando se deseja dar à mistura certo grau de intertravamento entre o agregado graúdo, como em misturas de graduação graúda, deve-se utilizar valores entre 95% e 105% da massa específica solta. No caso de agregados sujeitos à degradação, a massa específica escolhida deve se aproximar de 105% da massa específica solta, sendo que valores acima desse devem ser evitados devido à maior possibilidade de degradação do agregado e pela dificuldade de compactação em campo (VAVRIK *et al.*, 2002).

Segundo Vavrik *et al.* (2001) valores entre 90% e 95% da massa específica solta devem ser evitados porque possuem grande possibilidade de variação do grau de intertravamento dos agregados graúdos em campo, com tolerâncias permitidas pela PCP. No caso de misturas com graduação miúda, a massa específica escolhida deve ser inferior a 90% da massa específica solta, garantindo que o esqueleto mineral seja predominantemente controlado pela estrutura de agregado miúdo (VAVRIK *et al.*, 2001).

Para que haja a consolidação da mistura asfáltica deve-se considerar não apenas a massa específica escolhida, que pode ser afetada inclusive pela quantidade de finos da mistura, mas se deve considerar outros fatores como o efeito lubrificante do ligante asfáltico, a forma de compactação, as características morfológicas dos agregados, dentre outros.

2.3.2.4 Seleção Granulométrica para o Método Bailey

Na determinação da seleção granulométrica do Método Bailey, além de serem utilizados todos os parâmetros utilizados em outros métodos de seleção granulométrica, também devem ser considerados os seguintes parâmetros:

- massa específica de cada agregado;
- massa específica solta dos agregados graúdos;
- massa específica compactada dos agregados graúdos e finos;
- massa específica escolhida para os agregados graúdos;

- quantidade desejada dos agregados graúdos e finos;
- quantidade desejada de material passante na peneira 0,075mm (#200).

O Método Bailey pode ser utilizado tanto para as misturas de graduação graúda quanto para as finas. Os passos seguintes são apresentados de forma a criar um consenso para a determinação de uma mistura de agregados por volume e sua avaliação (VAVRIK *et al.*, 2002):

- determinar a massa específica escolhida dos agregados graúdos;
- calcular o volume de vazios no agregado graúdo;
- determinar a quantidade de agregado fino para preencher o volume de vazios, usando a massa específica compactada dos agregados finos;
- usando a densidade de cada agregado, determinar a massa total e converter para porcentagens individuais de agregados;
- corrigir a quantidade de agregado graúdo em função da quantidade de agregado fino que ele apresenta e também corrigir a quantidade de agregado fino em função da quantidade de agregado graúdo presente na fração fina, para assim garantir uma mistura adequada, em volume, de agregados graúdo e fino;
- determinar as porcentagens ajustadas da mistura para cada agregado;
- se forem usados materiais de preenchimento (fíler), ajustar a porcentagem de agregado fino pela porcentagem desejada de fino, para assim garantir a mistura, em volume, de agregado graúdo e fino;
- determinar as porcentagens individuais revisadas dos agregados para o uso na mistura calculada.

2.3.2.5 Análise da Mistura Selecionada pelo Método Bailey

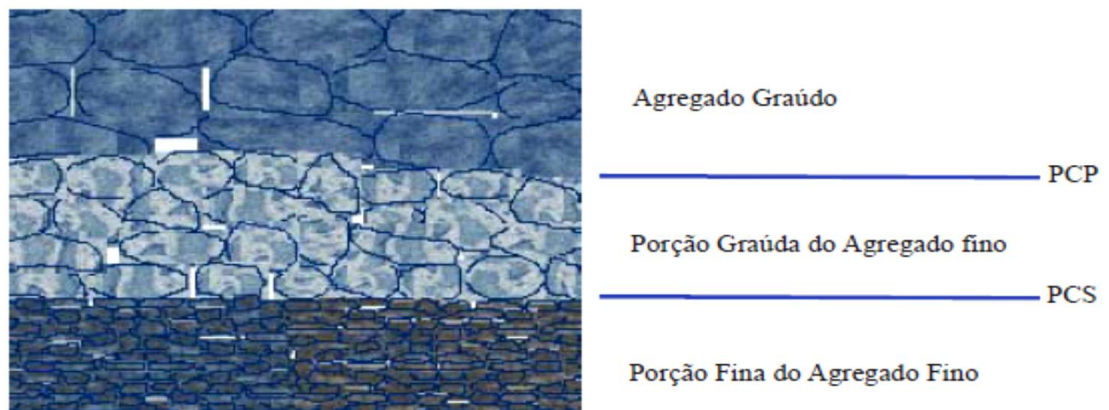
Após a seleção da granulometria da mistura, pelo método Bailey, as partículas que a compõe são divididas em três porções distintas para serem avaliadas individualmente. Essas três porções são formadas uma pelo agregado graúdo e duas pelo agregado fino. A porção graúda da mistura engloba desde a maior partícula até a PCP. O agregado fino é dividido em duas porções a partir da multiplicação da PCP pelo fator 0,22. Essa multiplicação fornece o valor da PCS, que faz uma divisão entre a fração graúda e a fração fina do agregado fino.

Por fim, a fração fina do agregado fino é avaliada pela PCT, que é determinada multiplicando a PCS pelo fator 0,22. Com a graduação determinada e tendo-se conhecimento das porções a serem avaliadas, é possível determinar e avaliar os parâmetros estabelecidos pelo método. A mistura deve atender aos parâmetros para que tenha aplicabilidade.

O Método Bailey define três parâmetros para a avaliação da composição de cada uma das três porções de graduação selecionada: proporção de agregados graúdos (proporção AG), proporção graúda dos agregados finos (proporção GAF) e proporção fina dos agregados finos (proporção FAF).

A Figura 5 mostra uma representação da divisão e classificação das porções de agregados de uma mistura de acordo com as peneiras de controle do Método Bailey.

Figura 5 - Esquema ilustrativo de divisões das graduações para análise em uma graduação contínua.



Fonte: VAVRIK *et al.* (2002).

Segundo Cunha (2004), esses fatores caracterizam a compactação dos agregados. Modificações podem ser feitas nas propriedades volumétricas, nas características de construção ou no desempenho da mistura asfáltica mudando-se a graduação com base em alterações nas Proporções AG, GAF e FAF.

2.3.3 Método Francês

Em 1980, na França, a necessidade de restauração das rodovias que atravessavam cidades e a reestruturação das vias lentas das autoestradas levaram à necessidade do desenvolvimento de pavimentos mais resistentes e duráveis. Assim surge o desenvolvimento dos revestimentos de módulo elevado, visando melhorar o desempenho mecânico e, em

contrapartida, reduzir as espessuras das camadas; daí as primeiras experiências com misturas asfálticas de módulo elevado (EME), sendo estudada e desenvolvida uma nova família de misturas asfálticas para camadas estruturais de pavimentos rodoviários, que apresentavam um comportamento superior às misturas tradicionalmente usadas, face aos danos de trincamento por fadiga e deformação permanente.

Para Villela (2012), as misturas asfálticas de módulo elevado (EME), utilizadas pelo método Francês são empregadas em pavimentos asfálticos de estrutura plena (do tipo *full depth*) ou estruturas mistas. Estas também são utilizadas na execução de restauração de pavimentos, ou seja, com a presença de substrato remanescente que, portanto, sofreu ações do tráfego ao longo de sua vida de serviço. O uso deste tipo de técnica pode resultar em redução da espessura final em até 25%, resultando numa economia de agregados e de ligante.

Bernucci *et al.* (2010) explicam que o método Francês desenvolveu várias concepções de combinação de granulometria e de ligantes especiais para comporem misturas asfálticas a serem utilizadas como camadas estruturais de revestimento, camada de ligação ou mesmo base de pavimentos.

Na França, a produção anual de misturas asfálticas usinadas a quente é de cerca de 40 milhões de toneladas. Isso exige a existência de um método eficaz para dosagem de misturas asfálticas com bom desempenho, adaptado às necessidades e ao contexto rodoviário francês (clima temperado que varia segundo a região avaliada; carga de eixo legal de 130 kN; volumes de tráfego variados, sendo muitas vezes elevado – cerca de 100.000 veículos por dia, dos quais 15% comerciais) (BROSSEAUD, 2002).

As misturas asfálticas do método Francês são definidas por normas e caracterizadas a partir de uma abordagem por meio de ensaios fundamentais, verificando o desempenho da mistura asfáltica em cada nível de formulação. A partir dos componentes selecionados (agregados, fíler, ligantes e aditivos) é realizada uma sequência de ensaios para avaliar o comportamento da mistura asfáltica. Essa sequência é escolhida com base no nível de ensaio requerido, de 1 até 4, realizando-se alternativamente ensaios complementares. O nível de ensaio depende geralmente da posição e espessura da camada, da mistura asfáltica e do tráfego previsto (LCPC, 2007).

As camadas do pavimento asfáltico devem ser concebidas de acordo com o fim a que se destinam, sejam em camadas com função de superfície ou função estrutural. De um modo geral, os projetos de pavimentos procuram atender as qualidades de excelência, garantindo segurança, conforto e durabilidade. No método Francês essa concepção centra-se no desempenho e nas características mecânicas da mistura, que são verificadas por meio do ensaio de módulo complexo (NF P 98-260-2) e do ensaio de fadiga do material (NF P 98 - 61-1).

Segundo Quintero (2011), os parâmetros como a rigidez (medida no ensaio de módulo complexo) e a deformação admissível (calculada a partir dos dados experimentais do ensaio de fadiga para um número de eixos equivalentes), que são medidos experimentalmente para as misturas asfálticas, são utilizados de maneira direta no dimensionamento da estrutura do pavimento.

De acordo com o método francês, existem três principais fatores que estão diretamente envolvidos no processo de obtenção de informação das características de misturas asfálticas:

- o primeiro concerne ao grupo de propriedades físicas, químicas e mecânicas consideradas como necessárias para avaliar o desempenho dos constituintes e da mistura;
- o segundo, ao grupo dos ensaios e métodos para fazer a medição das propriedades volumétricas e mecânicas;
- o terceiro, ao grupo de valores admissíveis, determinados experimentalmente, os quais são função das propriedades requeridas para o dimensionamento.

Leandro (2016) explica que o método francês de formulação de misturas asfálticas é caracterizado por apresentar uma abordagem baseada no desempenho das camadas. Os materiais que serão aplicados em camadas com propósito de uso estrutural devem ser submetidos a uma análise fundamental recomendada pelo método.

A etapa inicial de formulação de misturas asfálticas novas, definida como nível 0, é constituída pela composição dos esqueletos pétreos. Esta composição é caracterizada pelo fato de não serem adotadas faixas granulométricas, mas curvas de partida especificadas para cada tipo de mistura asfáltica (BARRA, 2009).

A Tabela 4 apresenta exemplos dos limites das porcentagens passantes para a distribuição granulométrica de partida de misturas do tipo EB-BBSG (*Béton Bitumineux Semi-Grenu*) e EB-BBME (*Béton Bitumineux à Module Élevé*) para D de 10 e de 14 mm, em que D é o maior valor entre duas opções:

- M/1,4, onde M é a menor abertura de peneira com 100% passante e;
- menor abertura de peneira correspondente a 85% passante.

Tabela 4 - Limites quanto à distribuição granulométrica de partida de misturas do tipo EB-BBSG e EB-BBME do método francês (LCPC, 2007)

Abertura da Malha da Peneira [mm]	% Passante para D 14mm			% Passante para D 10mm		
	Mínimo	Alvo	Máximo	Mínimo	Alvo	Máximo
10	-	78	-	-	97	-
6.3	47	52	58	45	57	68
4	-	47	-	-	52	-
2	25	31	35	27	34	39
0,063	6,3	6,8	7,2	6,3	6,7	7,2

Fonte: LCPC, 2007

Segundo Barra (2009) essas curvas constituem diretrizes para as formulações que estão sendo estudadas e podem ser ajustadas pelo projetista de acordo com as condições naturais e de beneficiamento disponíveis, porém elas devem estar de acordo com a norma correspondente ao tipo de mistura escolhida para projeto.






A partir da mistura de partida, outras formulações devem ser testadas, com outros teores de ligante e composições granulométricas, visando, ao final dos níveis de teste, verificar qual ou quais misturas estarão aptas a desempenhar as funções requeridas pelo projetista no campo (BARRA, 2009).

Após a definição das misturas de teste (nível 0 do método), este ainda é dividido em outros quatro níveis, variando do mais simples (nível 1) ao mais completo (nível 4). As exigências dos níveis superiores englobam as exigências dos níveis inferiores (SAUTEREY *et al.*, 2001; LCPC, 2007; BARRA, 2009; PEREZ, 2009).

O Laboratoire Central des Ponts et Chaussées – LCPC (2007) define as abordagens para o método de projeto de misturas asfálticas a quente em empírica e fundamental. A primeira abordagem é constituída pelas etapas denominadas de receita (nível 0), volumétrica (nível 1), de ensaios empíricos (nível 1) e de ensaios relacionados a desempenho (nível 2).

A abordagem fundamental compreende uma fase receita (nível 0), seguida por uma etapa volumétrica (nível 1) e por uma de ensaios de desempenho (nível 2), sendo que ao final têm-se os ensaios fundamentais propriamente ditos (níveis 3 e 4). A Figura 6 apresenta um desenho esquemático dos níveis de projeto de misturas asfálticas do LCPC (2007).

Figura 6 - Desenho esquemático da relação entre os níveis de projeto de misturas asfálticas do método francês e os respectivos ensaios

Geral + empírica			Geral + fundamental	
Nível 0	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4
				
Composição granulométrica e teor de ligante de partida	PCG e Duriez (dano por umidade induzida)	Afundamento em trilha de roda	Módulo Complexo	Fadiga

Fonte: Leandro, 2016 (adaptado de LCPC, 2007).

2.3.3.1 Níveis de Formulação

Na formulação da mistura pelo método Francês, o volume de vazios e a compacidade são os parâmetros mais importantes a serem considerados. Segundo o LCPC (2007) esses parâmetros estão diretamente relacionados às características importantes da mistura (textura, durabilidade e resistência) e são variáveis em relação ao tipo de mistura aplicada e ao tráfego e solicitações aos quais será submetida.

A dosagem se inicia com a seleção dos materiais adequados para o atendimento das exigências de projeto. Em seguida são realizadas avaliações das características da mistura e,

por último, são realizados ensaios de validação da sua utilização. Quintero (2011) expõe que os níveis de formulação da metodologia francesa são:

- nível 0: corresponde às especificações e características mínimas dos constituintes da mistura (ligantes, granular graúdo, fino e fíler);
- nível 1: avalia a facilidade de compactação e trabalhabilidade da mistura – parâmetros avaliados no ensaio de compactação por cisalhamento giratório – e avalia a sensibilidade à água da mistura asfáltica por meio do ensaio de Duriéz;
- nível 2: avalia o potencial de afundamento no ensaio de deformação permanente;
- nível 3: verifica a rigidez da mistura asfáltica determinada pelo módulo complexo a partir de solicitação sinusoidal em corpos-de-prova trapezoidais ou por tração uniaxial em corpos de prova cilíndricos. Esse ensaio permite desenhar a curva representativa do material e conhecer a rigidez da mistura em um amplo espectro de tempos de carga ou de frequências;
- nível 4: corresponde ao ensaio de fadiga realizado sobre corpos-de-prova trapezoidais a uma temperatura de 10°C e 25Hz. Este último nível de formulação centra-se na determinação da deformação do material para um milhão de solicitações.

De acordo com Leandro (2016), no nível 1 as misturas devem atender aos limites quanto ao volume de vazios a partir de corpos de prova moldados na Prensa de Cisalhamento Giratória (PCG). Esse nível também demanda a avaliação quanto ao dano por umidade por meio de ensaios de Duriez (AFNOR NF P 98-251-1).

Ainda na estimativa dos níveis de formulação do método, tem-se a avaliação do ensaio de afundamento em trilha de roda que é realizado em placas retangulares moldadas por rolagem pneumática, ensaio de módulo complexo e realização dos ensaios de fadiga. (LCPC, 2007).

Segundo o LCPC (2007), o nível 1 pode ser suficiente para misturas destinadas às vias de baixo volume de tráfego ($\geq T3+$, de acordo com a Tabela 5). Contudo, para misturas destinadas a volumes de tráfego médio e pesado torna-se necessária a realização dos níveis superiores. Na Tabela 5 estão apresentadas as classes de tráfego do método francês.

Tabela 5 - Classe de tráfego do método francês em função do volume diário médio de caminhões na faixa de projeto.

Classe de tráfego		Volume diário médio anual
T5		0 a 25
T4		25 a 50
T3	T3+	50 a 85
	T3-	85 a 150
T2	T2+	150 a 200
	T2-	200 a 300
T1	T1+	300 a 500
	T1-	500 a 750
T0	T0+	750 a 1200
	T0-	1200 a 2000
TS	TS+	2000 a 3000
	TS-	3000 a 5000
TEX		≥ 5000

FONTE: LCPC, 2007

2.3.3.2 Seleção de Misturas pelo Método Francês

Pereira (2012) explica que a escolha de um projeto de mistura adequado depende das propriedades dos materiais da mistura, do esqueleto pétreo e das características de compactidade. Portanto, para seleção adequada de misturas devem ser seguidos procedimentos apropriados.

O método Francês destaca os cinco passos empregados na seleção de misturas:

- seleção dos materiais a serem utilizados: agregados e ligante, essas informações irão resultar em dados compatíveis de análise pela especificação empregada para cada tipo de mistura;
- avaliação do comportamento desses materiais em laboratório por meio da realização de diversos ensaios; em 2006 foram criadas as especificações europeias de asfaltos duros, que incluem requisitos reológicos (VILLELA *et al.*, 2011);

- análise do resultado de deformação permanente da mistura;
- estudo do módulo complexo obtido em laboratório;
- determinação da vida de fadiga (DENNEMAN *et al.*, 2011).

2.3.4 Método da Faixa de Agregados Dominante (FAD)

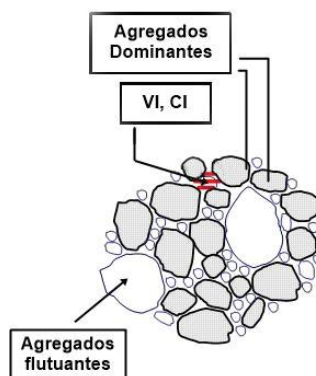
A fim de se ter um bom desempenho em campo, é importante que haja uma correta distribuição das partículas dos agregados na mistura asfáltica. Visando alcançar esse propósito, Kim (2006) propôs a teoria da faixa de agregados dominantes (FAD).

A Faixa de Agregados Dominantes, proposta por Kim (2006) na Universidade da Flórida, caracteriza a curva granulométrica em função de um ou mais tamanhos de agregados que interagem entre si para a formação de um esqueleto pétreo resistente. Dessa forma, a FAD está diretamente relacionada à resistência à deformação permanente. A proposta dessa metodologia é avaliar a estrutura formada pelos agregados graúdos (maiores que 1,18mm). Embora se saiba que outras propriedades dos agregados também são importantes para o desempenho da mistura asfáltica, essa metodologia foca apenas na distribuição granulométrica.

A FAD é composta basicamente pelas partículas graúdas que formam o esqueleto que resistirá à maior parte dos esforços impostos ao pavimento. Partículas de dimensões inferiores a FAD, juntamente com o ligante asfáltico, preenchem os espaços formados pela combinação das partículas graúdas. Esse material compõe o denominado Volume Intersticial (VI), do qual fazem parte os Componentes Intersticiais (CI), quais sejam, os agregados de dimensões inferiores a FAD, o ligante e os vazios com ar. O VI está fortemente ligado ao trincamento por fadiga e à energia de ruptura da mistura asfáltica. Além disso, mantém as partículas da FAD unidas, fornecendo adesão e resistência à tração (KIM, 2006; GREENE *et al.*, 2014; ROQUE *et al.*, 2015).

Por outro lado, as partículas maiores que a FAD simplesmente flutuam na matriz de agregados e acabam por não desempenhar um papel importante no esqueleto pétreo da mistura asfáltica (KIM *et al.*, 2009; GREENE *et al.*, 2014). A Figura 7 ilustra os componentes conceituais definidos pela metodologia FAD.

Figura 7 - Ilustração esquemática do modelo FAD-CI: conceito de FAD e CI.



Fonte: KIM *et al.*, 2009.

A determinação da FAD de uma curva granulométrica é realizada por meio do diagrama de interação. Esse diagrama foi desenvolvido a partir de uma análise espacial teórica de distribuição das partículas que compunham uma determinada granulometria (KIM, 2006). Os resultados dessa análise indicaram que, à medida que a proporção entre partículas maiores e menores (em duas peneiras contíguas) diminui, o espaçamento entre as partículas maiores aumenta. Além disso, dados dois tamanhos de agregados em peneiras consecutivas, o espaçamento entre ambas aumentará rapidamente na medida em que a proporção relativa entre elas chegar a 70/30. Isso quer dizer que a proporção relativa entre quaisquer duas peneiras consecutivas deve estar entre 70 e 30%, o que resulta em boa interação entre as partículas (KIM *et al.*, 2009).

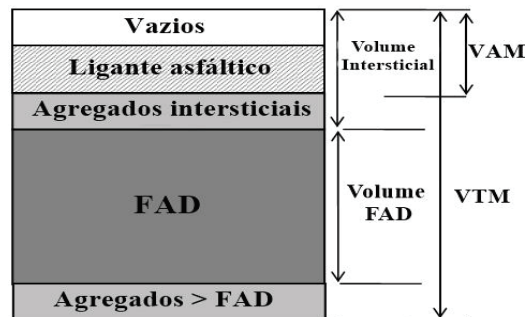
Outro parâmetro importante dessa metodologia é a porosidade. A literatura estabelece que a porosidade de materiais granulares no estado solto é aproximadamente constante entre 45 e 50% e independe de sua distribuição granulométrica (LAMBE e WHITMAN, 1969). Isso implica que a porosidade de materiais granulares não deve ser superior a 50%, garantindo contato entre os grãos. Numa mistura asfáltica, o volume de Vazios no Agregado Mineral (VAM) representa o volume disponível entre os agregados em uma mistura compactada, ou seja, o espaço ocupado por vazios e pelo ligante asfáltico. Tal conceito é análogo ao Volume de vazios (Vv), em um solo. A partir do Vv pode-se determinar a porosidade do solo.

Kim (2006) estendeu o conceito de porosidade de solo para mistura asfáltica, mais precisamente para a FAD. Dessa forma, a FAD seria equivalente aos grãos de um solo, enquanto o VI seria equivalente aos vazios entre esses grãos. Admitiu-se, portanto, que a

porosidade das partículas granulares que compõe a FAD não deve ser superior a 50%. A partir da consideração que uma mistura asfáltica possui uma quantidade efetiva de ligante e de vazios para uma dada granulometria (i.e., VAM), pode-se determinar a porosidade para uma única peneira, ou para peneiras contíguas, desde que estas interajam.

Ferreira *et al.* (2015) explicam que a identificação da FAD se inicia pela determinação do diagrama de interação, o qual indica quais peneiras estão interagindo. Os componentes da mistura asfáltica utilizados no cálculo da porosidade FAD estão ilustrados na Figura 8.

Figura 8 - Componentes da mistura asfáltica para o cálculo da porosidade FAD.



Fonte: FERREIRA *et al.* (2015)

Destaca-se que a FAD não consiste de uma metodologia de seleção granulométrica, mas em um método para avaliação das faixas de agregados escolhidas para compor a mistura, ou seja, para que seja realizada a avaliação da FAD é necessário a utilização de um outro método para seleção inicial da faixa de agregados.

Uma vez identificados os agregados da FAD, a porosidade é calculada pela Equação 2.

$$\eta_{FAD} = \frac{V_{v(FAD)}}{V_{T(FAD)}} = \frac{V_{IC,ag} + VAM}{V_{TM} - V_{ag>FAD}} \quad (\text{eq. 2})$$

Onde:

η_{FAD} : porosidade da FAD (%);

$V_{v(FAD)}$: volume de vazios dentro da FAD (%);

$V_{T(FAD)}$: volume total de agregado disponível para a FAD;

$V_{IC, ag}$: volume de agregados intersticiais (menores do que a FAD);

V_{AM} : volume de vazios no agregado mineral;

V_{TM} : volume total da mistura;

$V_{ag>FAD}$: volume de agregados flutuantes (maiores do que a FAD).

Greene *et al.* (2014) relatam que porosidades FAD entre 38 e 48% indicam misturas asfálticas com um bom intertravamento em sua granulometria e uma boa resistência à deformação permanente. Adicionalmente, porosidades FAD entre 48 e 52% representam misturas com contato intergranular questionável. Kim (2006) conclui que a metodologia FAD pode ajudar a eliminar misturas asfálticas que não terão um bom desempenho em campo tomando como base seu potencial de resistir aos esforços.

2.4 Pavimentação no Brasil e o Uso de Materiais Alternativos

De acordo com Bernucci *et al.* (2010) o pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente para resistir aos esforços provenientes do tráfego de veículos e do clima, bem como propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança. Desta forma, o pavimento deve ser executado de tal forma que apresente resistência e durabilidade, e ofereça qualidade de rolamento e segurança aos usuários.

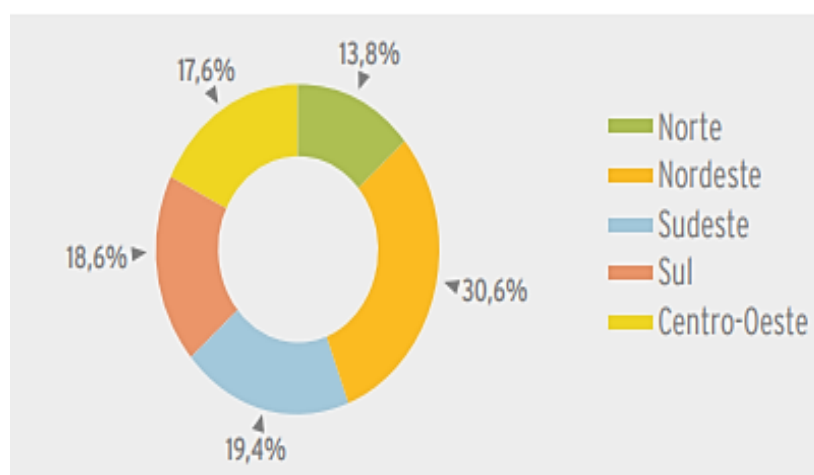
Dados do Conselho Nacional de Transportes - CNT (2017) revelam que o transporte rodoviário no Brasil é o principal meio para movimentação de cargas e pessoas, o que contribui significativamente para o desenvolvimento socioeconômico nacional. Este modal apresenta uma participação de mais de 61% na matriz de transporte de cargas e de 95% na de passageiros, fazendo com que a infraestrutura rodoviária seja a principal responsável pela integração de todo o sistema de transporte no país.

Segundo o Sistema Nacional de Viação – SNV (2016) a malha rodoviária nacional compreende 212.866 km de rodovias pavimentadas, contrapondo-se a 1.365.426 km de rodovias não pavimentadas. Apesar de apresentar números crescentes nos últimos anos, a

densidade da malha rodoviária pavimentada total do Brasil ainda é pequena, principalmente quando comparada com a de outros países de dimensão territorial semelhante ou com alguns países da América Latina. Verifica-se que são aproximadamente 25 km de rodovias pavimentadas para cada 1.000 km² de área, o que corresponde a apenas 12,3% da extensão rodoviária nacional. Enquanto nos Estados Unidos são 438,1 km por 1.000 km² de área; na China, 359,9 km e na Rússia, 54,3 km. Dados que revelam a necessidade de investimentos para ampliação e melhoria desse modal.

Observando ainda a pesquisa CNT de rodovias (2017) têm-se os dados de rodovias pavimentadas por região, o que leva à constatação da desigualdade entre regiões conforme apresentado na Figura 9.

Figura 9 - Percentual da extensão de rodovias federais pavimentadas por região



Fonte: Pesquisa CNT de Rodovias 2017.

Observando este cenário, verifica-se o quão necessário se faz a execução de projetos de pavimentação em todo território brasileiro, principalmente quando se leva em consideração o fato de que o progresso do país ocorre quase em sua totalidade por meio do uso da malha rodoviária.

Entretanto, parte das rodovias não pavimentadas encontram como obstáculo o custo e a escassez de materiais convencionais, o que faz com que haja a necessidade de busca de novas alternativas. Dessa forma, torna-se necessário a busca por materiais alternativos reciclados ou existentes nas localidades que substituam ou reduzam o uso das matérias primas convencionais.

Ao longo dos anos, pesquisas como as de Tavares (2012), Quiñones (2014) e Aragão *et al.* (2016) testaram a substituição total ou parcial dos agregados convencionais por agregados alternativos como os resíduos de construção e demolição, e os seixos rolados. Estas pesquisas apresentaram resultados satisfatórios, uma vez que atendem às especificações normativas.

Tavares (2012) estudou a utilização de agregado siderúrgico em misturas asfálticas. Em sua pesquisa, o autor verificou que os valores para o ensaio de módulo de resiliência, resistência à tração indireta, dano por umidade induzida, fadiga e *flow number* estão na mesma ordem de grandeza dos valores de ensaios com materiais convencionais e atendem às especificações normativas vigentes.

Quiñones (2014) avaliou o uso de agregados oriundos de resíduos de construção e demolição (RCDs) como alternativa ao uso dos agregados convencionais em misturas asfálticas. No estudo ele verificou que os resultados dos ensaios de dano por umidade induzida apresentaram resultados inferiores em cerca de 11% quando comparados a mistura convencional, resultado que ele justifica com a alta absorção dos RCD's. O autor verificou ainda que nos ensaios de resistência à tração as misturas apresentam valores de RT 9% maiores que os das misturas utilizando agregados naturais e que a adesividade não foi satisfatória, uma vez que o teor de asfalto convencional de 5% não foi suficiente para promover o recobrimento das partículas. Assim, o autor conclui que o uso do agregado reciclado pode se tornar uma solução para regiões com carência de agregados naturais, mas deve ter seu custo devidamente analisado, considerando um eventual aumento do consumo de ligante e a distância média de transporte.

Aragão *et al.* (2016) analisaram a utilização do seixo rolado em substituição ao agregado granítico. Na pesquisa os autores verificaram que os resultados dos ensaios de módulo de resiliência, módulo dinâmico, *flow number*, resistência à tração e fadiga apresentam resultados satisfatórios uma vez que as misturas se enquadraram para atender níveis de tráfego prescritos em norma. De maneira geral, as combinações do seixo rolado e da brita de característica mais cúbica (seis distintas: 100% de brita, 75% de brita e 25% de seixo, 50% de brita e 50% de seixo, 25% de brita e 75% de seixo, e 100% de seixo) avaliados na pesquisa resultaram em misturas com desempenho similar ou superior ao de misturas asfálticas contendo somente agregado britado lamelar, que configura uma opção de

utilização de seixo rolado para regiões onde esse agregado é presente e haja indisponibilidade da brita granítica.

Ao citar o fato da indisponibilidade de brita granítica (mais convencionalmente utilizada) em algumas regiões, reforça-se a necessidade da busca de materiais alternativos primando pela escolha daqueles que estejam disponíveis mais facilmente, e possam reduzir os custos e os impactos ambientais, avaliando também os fatores regionais.

Analisando os dados da pesquisa CNT (2017) é possível verificar que as regiões norte e centro-oeste são as que apresentam menor percentual de rodovias pavimentadas. Em contrapartida a este dado têm-se, que estas são as regiões que apresentam maior disponibilidade de solos lateríticos. Solos estes que dão origem às concreções que podem ser beneficiadas e utilizadas nas misturas asfálticas como opção de substituição aos agregados graníticos convencionais.

Nesse contexto, e observando os resultados positivos obtidos da aplicação de agregados alternativos em misturas asfálticas, é possível propor a utilização de agregados lateríticos em substituição aos agregados convencionais, como forma de reduzir custos e melhorar as condições de rolamento das rodovias, principalmente nas regiões norte e centro oeste.

2.4.1 Laterita como Material Alternativo

A primeira referência ao termo laterita surgiu em 1807, na Índia, quando Buchanan observou que esse solo, quando exposto ao sol, secava e endurecia, podendo ser usado como blocos na construção. Daí ter derivado do termo later, que em latim significa “tijolo”. Contudo, em Latérite et Graveleux Latéritique (1983), Autret chama a atenção para o fato de essa definição de Buchanan ter apenas significado histórico, já que as lateritas conhecidas atualmente não permitem fazer tijolos para construção.

Os solos lateríticos típicos de regiões tropicais e subtropicais são produtos de processos de intemperismo físico e químico, em rochas sãs ou até mesmo em outras rochas já intemperizadas. As chuvas abundantes e períodos de estiagem definidos, nestas regiões, aceleram os processos de intemperismos, proporcionando uma ação mais rápida sobre as

rochas, desintegrando-as. Esses solos ocupam as camadas mais superficiais e apresentam coloração na qual predominam as matizes de vermelho e amarelo, e ainda uma macroestrutura aparentemente homogênea.

No Brasil, quando se trata da laterita no meio rodoviário diz-se a respeito de um solo concrecionado, enriquecido com óxidos hidratados de ferro ou alumínio, possuindo a caulinita como argilo mineral e, de maneira geral, com coloração vermelha, amarela, marrom ou alaranjada.

Souza (2007) relata que, pedologicamente, os solos lateríticos são uma variedade de solo superficial pedogenético, típico das partes bem drenadas das regiões tropicais úmidas. A denominação de laterita lavada é dada ao agregado resultante do processo de separação dos agregados graúdos deste material, que são maiores que 4.8mm e passam por lavagem. Define-se ainda como laterita as concreções que constituem um maciço em forma de crosta ou carapaça, possuem aspecto vesicular e são compostos essencialmente por óxidos de ferro e alumínio, além de silicatos.

Os agregados lateríticos possuem características físicas e químicas bem definidas e podem apresentar variações dependendo da jazida de onde forem coletados. Parâmetros como massa específica, absorção e resistência ao desgaste são representativas do material.

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

Em regiões como Norte e Centro Oeste do Brasil, muitas vezes os projetos são onerados e acabam por não serem executados devido à especial necessidade de importação de agregados britados convencionais, como é o caso dos agregados graníticos. Esses agregados são transportados de longas distâncias devido à escassez dos mesmos nas proximidades, e ao final os custos acabam sendo muito elevados e representam uma parcela significativa em projetos como os de pavimentação por exemplo. Em contrapartida, têm-se o fato de que essas regiões apresentam disponibilidade de jazidas de materiais lateríticos, que podem ser beneficiados a fim de se obter agregados para utilização nos projetos.

Desde 1976 a laterita é considerada um material aprovado pela Associação Brasileira de Pavimentação (ABPv) para ser utilizada em camadas de base, sub-base e revestimento primário em projetos de pavimentação asfálticas. A ABPv notifica que as primeiras experiências com este material ocorreram por volta de 1953 nos estados do Pará e Maranhão, enquanto que Amaral (2004) relata experiências com esse agregado, para revestimento da pista de pouso e decolagem do aeroporto de São Luís no estado do Maranhão, datando de 1943.

Amu *et al.* (2011) afirmam que o comportamento das lateritas em pavimentos depende do tráfego ao qual está sujeito, das condições ambientais, das características granulométricas, da natureza e resistência da fração grossa, assim como do grau de compactação.

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

Apesar de a laterita ser um material poroso e apresentar alto índice de vazios com conseqüente baixa capacidade de suporte; após a sua compactação este material apresenta ampla utilização em obras como as de construção de barragens de terra, e, principalmente na pavimentação, onde esse agregado é empregado nas camadas de fundação do pavimento, como base e sub-base para o revestimento asfáltico (MARTINÉZ, 2003).

Martínéz (2003) explica que algumas características do agregado laterítico se distanciam das encontradas do agregado granítico para aplicação em revestimentos asfálticos, como por exemplo, alta absorção e uma baixa resistência à abrasão Los Angeles. A alta absorção do agregado laterítico faz com que este absorva maior quantidade de ligante asfáltico, sendo um ponto desfavorável deste tipo de agregado. Entretanto, esse agregado apresenta abundância em algumas regiões em que o agregado granítico não tem tanta disponibilidade e viabilidade econômica, o que caracteriza um ponto positivo desse agregado.

Alguns estudos recentes como o de Amaral (2004) e Costa *et al.* (2016) sobre a utilização da laterita em misturas asfálticas mostraram resultados dentro dos limites estabelecidos em norma para ensaios como resistência à tração, estabilidade Marshall e Módulo de resiliência; revelando ser um material de grande potencial para ser utilizado em alternativa a brita granítica.

Observa-se que não há um conceito comum entre engenheiros e geólogos em relação à definição de lateritas, mas há um consenso quando se verifica a vantagem de utilizá-la como material alternativo tendo em vista suas propriedades e principalmente sua disponibilidade em regiões onde há escassez dos agregados convencionais.

2.4.1.1 Uso da Laterita em Misturas Asfálticas

No Brasil, geralmente utilizam-se agregados naturais de origem granítica para compor as frações das misturas asfálticas utilizadas para execução de pavimentos. Embora em algumas localidades, como nas regiões Norte e Centro Oeste, haja grande disponibilidade de outros tipos de concreções, como as lateríticas, esse tipo de material ainda é pouco utilizado devido, principalmente, à falta de estudos e normas que o referencie. Esse fato faz com que muitas vezes sejam executados pavimentos com altos custos devido aos gastos elevados com transporte de materiais de outras localidades.

De acordo com Moizinho (2007), o primeiro emprego de agregados de origem laterítica que se tem conhecimento no Brasil foi o do revestimento da pista de pouso e decolagem do aeroporto de São Luiz do Maranhão, no ano de 1943, durante a segunda guerra mundial, feito pelo corpo de Engenharia do Exército Americano. A mistura asfáltica utilizando a laterita, após ser lavada e peneirada, como agregado graúdo, apresentou um bom desempenho que pode ser verificado em sua resistência após vinte anos.

Amaral (2004) realizou uma pesquisa para uma mistura asfáltica com agregado graúdo laterítico do município de Benevides, no Estado do Pará, e dele obteve os parâmetros mecânicos que estão apresentados na Tabela 6. A autora relata que os resultados dos ensaios de resistência à tração e de módulo de resiliência, ambas por compressão diametral, indicam que a mistura laterita - ligante possui rigidez compatível com a das misturas de alta densidade.

Tabela 6 - Características Marshall e mecânicas de misturas asfálticas usinadas a quente com laterita do Estado do Pará (Amaral, 2004).

Mistura Betuminosa	Ligante (%)	EM (kN)	Fluência (mm)	VV (%)	RBV (%)	γ_A (kN/m ³)	σ_t (MPa), 25°C	MR (MPa)
Granulometria A CAP 50/60	6,0	12,30	2,31	6,5	62,0	21,29	1,50	7983
	7,0	11,59	2,65	4,0	76,4	21,60	1,65	7878
	8,0	8,84	3,31	1,6	90,9	21,85	1,44	6755

EM = Resistência ao esmagamento; γ_A = Massa Específica Aparente; VV = Volume de Vazios;

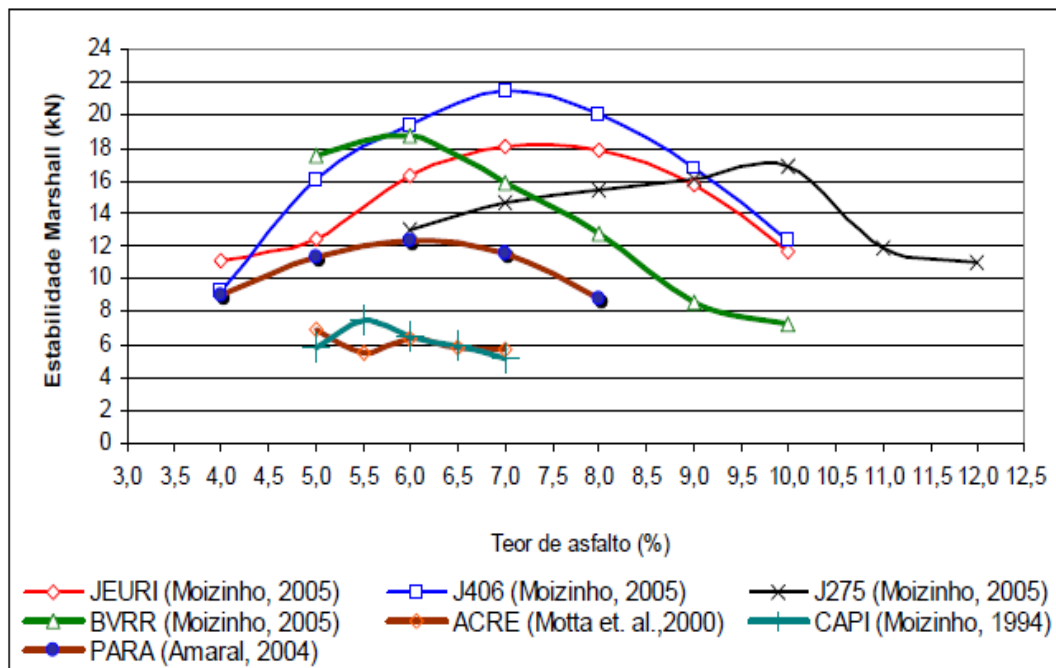
RBV = Relação Betume Vazios; σ_t = Resistência à Tração Indireta; MR = Módulo de Resiliência.

Fonte: MOIZINHO, 2007.

Ao longo dos anos, estudos como os de Amaral (2004) e Moizinho (2007) foram realizados utilizando materiais de origem laterítica, e os resultados apresentados atenderam em sua maioria aos valores exigidos pelas determinações normativas vigentes.

A Figura 10 apresenta um gráfico onde são expostos os valores de estabilidade Marshall obtidos por diferentes pesquisadores em função do tipo de agregado laterítico e teor de ligante. Verifica-se nele que as misturas densas apresentaram valores elevados de estabilidade para teores de ligante de 5% a 7% quando comparado às demais misturas, que têm significativa queda no valor da estabilidade. Esse fato mostra a importância do tipo de asfalto, da composição da mistura, tipo de agregado graúdo, miúdo e fíler.

Figura 10 - Valores de estabilidade para misturas betuminosas do Norte e Nordeste do Brasil usando agregados lateríticos.



Fonte: Modificado de Motta *et al.*, 2000 (Moizinho 2007)

As curvas apresentam variações de comportamento significativas que são função principalmente do teor de asfalto. No entanto, ao ser feita uma análise dos fatores que influenciam a estabilidade Marshall, verifica-se que esse parâmetro é fortemente influenciado pelo aumento de finos na mistura, fato este que pode ser utilizado também como justificativa dos resultados, uma vez que foram utilizados tipos de concreções lateríticas distintas e de granulometrias também distintas.

De posse dos dados de pesquisas anteriores é possível observar que os estudos realizados com a utilização de agregados lateríticos em misturas asfálticas apresentam resultados positivos significativos e que justificam a realização de estudos com a aplicação do material.

Deve-se ressaltar que a maioria dos estudos supracitados, tanto em campo quanto em laboratório, foram realizados no final do século XX, consideravam um menor número de parâmetros e não utilizavam métodos de dosagem tão criteriosos. Por isso faz-se necessário à realização de novos estudos que utilizem as técnicas de dosagem atuais e levem em conta parâmetros atualizados para avaliação das misturas.

Desse modo, avaliar a viabilidade da utilização de agregados de origem laterítica em misturas asfálticas é uma discussão válida uma vez que já existem trabalhos de laboratório que mostram que é possível conseguir misturas asfálticas com agregados lateríticos tão boas quanto àquelas fabricadas com agregados graníticos, e que atendem às exigências de resistência e durabilidade dos órgãos rodoviários. O uso de agregados lateríticos também pode ser justificado por meio dos exemplos de bom desempenho de alguns trechos de rodovias pavimentadas utilizando-se agregado graúdo desse tipo.

2.5 Considerações Finais

Os tópicos apresentados neste capítulo permitiram evidenciar a importância do estudo e avaliação das propriedades morfológicas dos agregados, bem como da adequada seleção granulométrica desses para compor misturas asfálticas.

Os agregados compõem cerca de 95% das misturas asfálticas e são responsáveis por resistir à maioria dos esforços impostos ao pavimento, sendo de fundamental importância que atente-se às suas características físicas e morfológicas para que seja feita uma escolha cuidadosa e adequada. Vale destacar que as três principais características que devem ser observadas são a forma, a textura superficial e a angularidade.

A escolha do tipo de material adequado e a distribuição granulométrica são os principais fatores responsáveis pelo desempenho da mistura quanto à durabilidade, estabilidade, trabalhabilidade, resistência aos danos por fadiga, resistência às deformações permanentes e aos danos por umidade. Assim sendo, torna-se imprescindível que sejam utilizados métodos de seleção granulométrica.

Abordando esta análise, foram estudadas as metodologias DNIT, Bailey e Francesa de seleção granulométrica. A metodologia DNIT é a mais comumente utilizada no Brasil, se baseia em faixas granulométricas preestabelecidas, a partir das quais enquadram-se as frações de agregados que estão sendo trabalhadas. Na metodologia Bailey considera-se as porções de agregados finos e graúdos e busca-se um intertravamento adequado da mistura a partir de parâmetros. Já a metodologia francesa considera níveis de formulação que observam desde o tráfego proposto até a camada de aplicação da mistura, quanto maior o nível de formulação mais parâmetros a mistura necessita atender.

O método FAD foi descrito com o intuito de utilizá-lo para avaliar as misturas obtidas pelos métodos de seleção granulométrica descritos. Essa metodologia avalia a interação dos grãos e sugere que misturas com porosidade adequada apresentam melhores desempenhos frente às deformações permanentes.

Verificado que o Brasil utiliza o modal rodoviário como principal, os números revelam que há deficiência na qualidade e inclusive na existência de pavimentos. Na literatura corrente foi possível obter dados para avaliação da aplicação de materiais alternativos, confirmando a possibilidade de substituir materiais convencionais a partir de seus resultados satisfatórios.

Observando dados da aplicação e disponibilidade dos agregados lateríticos no Brasil, bem como avaliando os estudos já existentes, que apresentam resultados significativos quanto aos limites estabelecidos em normas, constatou-se que esse agregado apresenta potencial positivo para aplicação em misturas asfálticas em substituição aos materiais convencionais.

3 METODOLOGIA

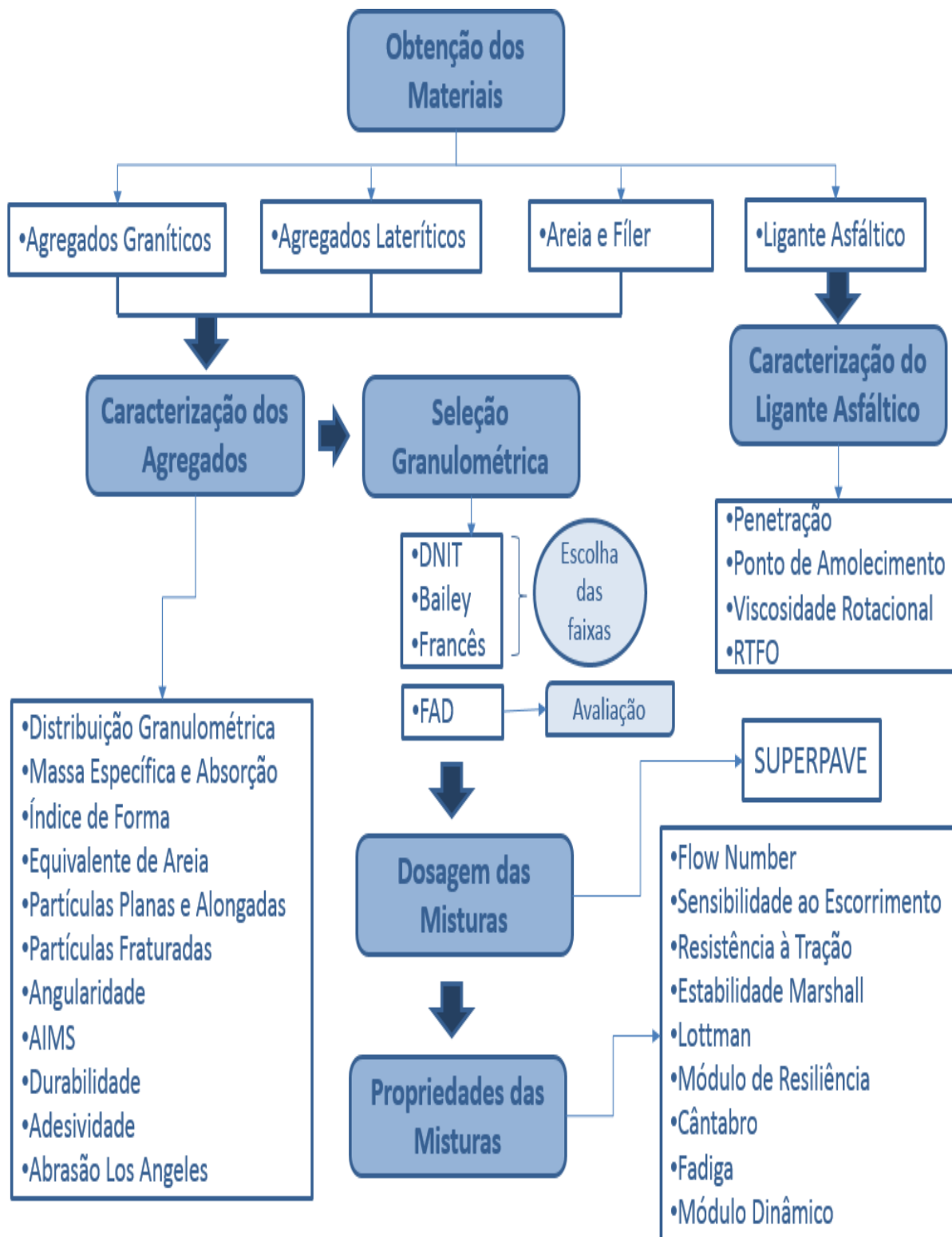
Neste capítulo estão descritos os materiais e os métodos utilizados nesta pesquisa. Nos tópicos são apresentados os materiais e suas origens, assim como os procedimentos e ensaios realizados para caracterização dos agregados e do ligante. Descreve-se ainda os métodos de seleção granulométrica, adotados para escolha das faixas de agregados utilizadas nas misturas ensaiadas, bem como as dosagens das mesmas misturas e, por fim, estão apresentadas as propriedades mecânicas das misturas após compactação.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), seguindo as prerrogativas das normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), do DNIT, da American Society for Testing and Materials (ASTM) e da American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).

Apenas o ensaio de avaliação dos agregados (*AIMS2*) foi realizado na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), no Laboratório de Geotecnia do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE).

O processo experimental adotado foi o exposto no fluxograma da Figura 11.

Figura 11 - Fluxograma do programa experimental da pesquisa.



3.1 Materiais

Neste tópico estão apresentados os materiais utilizados na realização da pesquisa, bem como sua origem.

3.1.1 Agregados

Nesta pesquisa foram utilizados dois tipos de agregados graúdos, um granítico e um laterítico, a fim de se obter um comparativo e verificar a possibilidade de enquadramento de materiais distintos dos convencionalmente utilizados. Para compor a mistura foram utilizados ainda pó de pedra, de origem granítica e de origem laterítica, areia e fíler. Os materiais utilizados na pesquisa foram obtidos na região da cidade de Campina Grande – Paraíba a exceção do agregado laterítico que foi oriundo da cidade de Mari – PB.

3.1.1.1 Agregados Graníticos

O agregado granítico foi utilizado nesta pesquisa a fim de obter-se um parâmetro comparativo; por este ser nacionalmente reconhecido como o agregado mais adequado para utilização em misturas asfálticas. Os agregados graníticos, de graduação 19.0 mm, 9.5 mm e pó de pedra (Figuras 12, 13 e 14 respectivamente) foram cedidos pela pedreira da empresa Rocha da jazida localizada na cidade de Campina Grande – PB. A amostra foi selecionada por quarteamento, método B da norma DNIT PRO 199/96.

Figura 12 - Agregado Granítico na fração 19.0 mm



Figura 13 - Agregado Granítico na fração 9.5 mm



Figura 14 - Agregado Granítico na fração Pó de Pedra.



3.1.1.2 Agregados Lateríticos

O agregado laterítico foi utilizado nesta pesquisa a fim de verificar a possibilidade de enquadramento em misturas asfálticas nas regiões onde há escassez dos materiais convencionais e abundância desse. Os agregados lateríticos, de graduação 19.0 mm, 9.5 mm e pó de laterita (Figuras 15, 16 e 17 respectivamente), foram provenientes da jazida Mari,

localizada na cidade de Mari – PB. A amostra foi selecionada por quartejamento, método B da designação DNIT PRO 199/96.

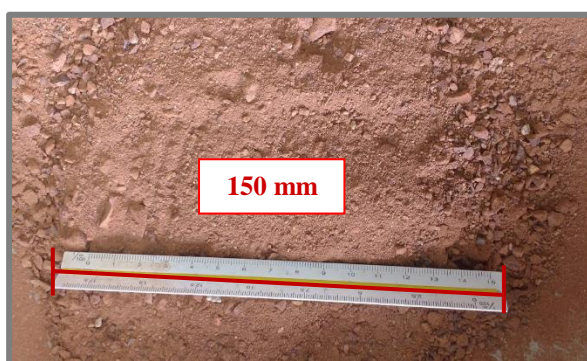
Figura 15 - Agregado Laterítico na fração 19.0 mm.



Figura 16 - Agregado Laterítico na fração 9.5 mm.



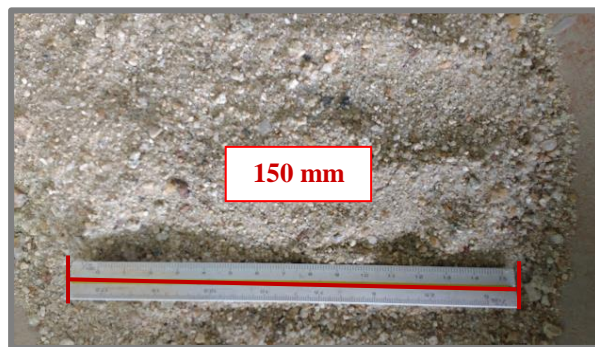
Figura 17 - Agregado Laterítico na fração Pó de Laterita.



3.1.1.3 Areia

A areia (Figura 18) utilizada na produção das misturas asfálticas da pesquisa foi adquirida no comércio local da cidade de Campina Grande – PB. A amostra foi selecionada por amostragem de pilha de estoque em miniatura, método C da designação DNIT PRO 199/96.

Figura 18 - Areia utilizada no preparo das misturas asfálticas.



3.1.1.4 Fíler

O fíler utilizado na produção das misturas asfálticas foi a cal hidratada CHI (Figura 19) da marca Mega Ó, obtida no comércio local da cidade de Campina Grande – PB.

Figura 19 - Cal Hidratada utilizada no preparo das misturas asfálticas



3.1.2 Ligante Asfáltico

Para realização da mistura asfáltica da pesquisa foi utilizado cimento asfáltico de Petróleo CAP 50/70 (Figura 20) fornecido pela usina de beneficiamento da empresa Rocha, localizada na cidade de Campina Grande – PB.

Figura 20 - CAP 50/70 utilizado nas misturas asfálticas.



3.2 Métodos

Para realização da análise da influência da escolha dos agregados na resistência das misturas asfálticas foram realizadas caracterizações físicas de dois tipos de agregados distintos, sendo um agregado granítico e um agregado laterítico. Em seguida foram realizadas dosagens granulométricas seguindo os parâmetros do método do DNIT, método Bailey e método Francês, além da posterior avaliação por meio do método FAD, a fim de obter uma mistura adequada quanto à resistência. Depois de moldados os corpos de prova, para cada método, foram realizados ensaios para verificar características de resistência e durabilidade da mistura.

Para realização das análises foram utilizados os ensaios e metodologias apresentados nos itens subsequentes.

3.2.1 Caracterização dos Agregados

Para a avaliação das diferentes propriedades de forma, angularidade e textura superficial foram selecionados dois tipos de agregados com características diferentes.

Para os agregados selecionados foram realizados os ensaios de caracterização física. Neste tópico, estão apresentados os procedimentos adotados para avaliação dos agregados.

3.2.1.1 Distribuição Granulométrica dos grãos

Os ensaios de granulometria realizados com os agregados em estudo foram executados de acordo com a norma DNIT ME 083/98. A realização desses ensaios teve como objetivo obter a distribuição granulométrica dos materiais ensaiados a partir do peneiramento manual por meio da série de peneiras normatizada.

A partir da realização dos ensaios foi possível determinar a porcentagem em peso que cada faixa especificada de tamanho de partículas representava na massa total ensaiada, onde a massa total foi dividida em faixas de tamanhos de grãos, exprimindo-se a massa de cada faixa em porcentagem da massa total, possibilitando dessa forma a construção das curvas granulométricas para cada faixa de agregados, curvas importantes para determinação dos parâmetros da mistura.

3.2.1.2 Massa Específica e Absorção

O procedimento seguido para a determinação da massa específica e absorção dos agregados graúdos (retidos na peneira #4) foi o método de ensaio DNIT ME 195/97. Enquanto que para os agregados miúdos (passantes na peneira #4) obteve-se o valor da massa específica por meio da norma NBR NM 52/2009 e o valor da absorção por meio da NBR NM 30/01.

O ensaio de massa específica teve como objetivo determinar a massa da unidade de volume do agregado, excluindo-se os vazios entre os grãos e os poros permeáveis, considerando então como se o agregado fosse totalmente maciço, de forma que não houvesse nenhum espaço (internamente ou externamente). Enquanto que o ensaio de absorção

objetivou obter a relação da massa de água absorvida pelo agregado graúdo e miúdo após período de imersão.

3.2.1.3 Índice de Forma

O ensaio de índice de forma seguiu as recomendações prescritas na norma DNIT ME 086/94. Para realização do ensaio foram utilizados conjuntos de crivos de aberturas retangulares e circulares, nos quais foram passadas as amostras previamente selecionadas. A realização desse ensaio tem por objetivo a determinação dos eixos multidirecionais das partículas que compõem o agregado por meio do índice de forma, e a partir de seus resultados é possível avaliar a cubicidade das partículas.

Bernucci *et al.* (2010) explicam que o índice de forma pode variar de 0,0 a 1,0, sendo o agregado considerado de ótima cubicidade quando $f = 1,0$ e lamelar quando $f = 0,0$. As prescrições de materiais para pavimentação adotam o limite mínimo de $f = 0,5$ para aceitação de agregados quanto à forma.

3.2.1.4 Equivalente Areia

O ensaio foi executado de acordo com o descrito na norma DNIT ME 054/97 e determina a proporção relativa de materiais do tipo argila ou pó em amostras de agregados miúdos.

Tal ensaio consiste de uma relação volumétrica que corresponde à razão entre a altura do nível superior da areia e a altura do nível superior da suspensão argilosa de uma quantidade de agregado miúdo estabelecida em norma, colocada numa proveta, em condições estabelecidas.

O ensaio consistiu basicamente em adicionar a amostra de agregado miúdo (passante na peneira de abertura 4.75mm) à solução defloculante, agitar por 30 segundos de modo a soltar as partículas de argilominerais ou da fração argilosa, aderidas ao agregado, e em seguida aguardar para que as partículas entrassem em repouso e fosse possível medir com régua específica a altura do nível de areia e da fração argilosa.

As especificações do DNIT de materiais para pavimentação definem que para que um agregado possa ser utilizado em misturas asfálticas, o equivalente de areia deve ser de pelo menos 55%.

3.2.1.5 Partículas Alongadas e Achatadas (*F&E*)

O ensaio de partículas alongadas e achatadas foi executado a fim de realizar a determinação das porcentagens dessas contidas no agregado graúdo. Os procedimentos seguidos foram os estabelecidos pela norma ASTM D 4791/10 e permitiram obter a razão dimensional entre o comprimento e a espessura de partículas de uma amostra representativa dos agregados em análise, por meio do uso de um paquímetro específico (Figura 21).

A especificação, aplicada aos agregados graúdos (maiores do que 4.75 mm) de misturas asfálticas, exige a avaliação da forma da partícula somente quanto a sua lamelaridade, com razão dimensional de 5:1. Nesse ensaio são medidos dois valores: a porcentagem de partículas alongadas e a porcentagem de partículas achatadas, sendo 10% o valor máximo admitido para a soma das porcentagens.

Figura 21 - Paquímetro utilizado para realização do ensaio de partículas alongadas e achatadas.



3.2.1.6 Partículas Fraturadas

Para realização do ensaio de determinação da porcentagem de partículas fraturadas, contida em uma amostra de massa conhecida de agregados graúdo, foi utilizada a recomendação normativa ASTM D 5821/13. O ensaio consistiu em espalhar os agregados

em uma superfície plana e limpa, e em seguida realizar um exame visual em cada partícula (Figura 22). Assim, cada partícula foi classificada de acordo com seu número de faces fraturadas, considerando como face fraturada o lado que contém forma e bordas bem definidas e que expõe o interior da partícula por meio de uma área não inferior a $\frac{1}{4}$ da área máxima da partícula.

A porcentagem de partículas fraturadas foi determinada a partir da contagem das partículas com uma e com duas faces fraturadas em relação ao número total de partículas analisado na amostra.

Figura 22 - Ensaio de partículas fraturadas (exemplos).



3.2.1.7 Angularidade

O ensaio de determinação da angularidade do agregado miúdo foi realizado de acordo com a ASTM C 1252/17. Esse ensaio determina a porcentagem dos vazios não compactados contidos entre as partículas de agregados quando essas são vertidas de uma altura de queda estabelecida, dentro de um cilindro de volume conhecido (100cm^3) (Figura 23).

O valor da angularidade do agregado será maior quanto maior a angularidade e rugosidade das partículas, pois quando elas caem livremente umas sobre as outras, sem sofrer acomodação por compactação, suas arestas e cantos agudos fazem com que fiquem mais distantes umas das outras, aumentando o volume de vazios entre partículas. Dessa forma, o valor da angularidade dos agregados miúdos utilizados na pesquisa foi determinado a partir de três determinações obtidas pelo método B. Em seguida foi analisada a aplicação do agregado de acordo com o tipo de tráfego.

Figura 23 - Equipamento utilizado para realização do ensaio de angularidade.



O cálculo da angularidade dos agregados ensaiados foi realizado utilizando a equação 3:

$$U = \frac{V - \left(\frac{F}{G}\right)}{V} \cdot 100 \quad (\text{eq.3})$$

Onde:

U: quantidade de vazios não compactados, %;

V: volume do cilindro padronizado, cm³;

F: massa do agregado miúdo retida no cilindro padronizado, g;

G: massa específica real do agregado miúdo, g/cm³.

3.2.1.8 Aggregate Imaging Measurement System (AIMS).

O ensaio utilizando o sistema *AIMS 2* ainda não é preconizado por norma. No entanto, Pazos (2015) relata que trabalhos como os de Bathina (2005); Mahmoud (2005); Masad *et al.* (2006); Mahmoud *et al.* (2010); Bessa *et al.* (2011, 2012) e Alves (2014) fornecem o embasamento necessário para realização de tal ensaio, considerando que essas

literaturas indicam boa representatividade das propriedades de agregados medidas, utilizando o sistema.

Os ensaios foram realizados utilizando o sistema *AIMS 2* apresentado na Figura 24. As quantidades mínimas de partículas por peneira sugeridas pelo manual do equipamento estão dispostas na Tabela 7.

Figura 24 – Equipamento *AIMS 2* utilizado para realização dos ensaios.



Fonte: PAZOS, 2015.

Tabela 7 - Quantidades mínimas de partículas estabelecida para o ensaio *AIMS 2*.

Tamanho da Peneira	Número de Partículas Sugerido
19.00 mm (3/4")	50
12.50 mm (1/2")	50
9.50 mm (3/8")	50
4.75 mm (#4)	50
2.36 mm (#8)	150
1.18 mm (#16)	150
0.60 mm (#30)	150
0.30 mm (#50)	150
0.15 mm (#100)	150
0.075 mm (#200)	150

Para realização do ensaio foram utilizadas bandejas específicas para cada tamanho de partícula investigado, tais bandejas foram selecionadas de acordo com o manual do equipamento. Nessas bandejas circulares as partículas dos agregados foram posicionadas nas ranhuras (Figura 25).

Figura 25 – Partículas posicionadas na bandeja do equipamento para realização do ensaio.



Fonte: PAZOS, 2015.

Depois do alinhamento das partículas nas bandejas, a câmera de alta resolução e o sistema de iluminação do *AIMS 2* foram usados para capturar imagens dos agregados. Partículas em contato não foram consideradas na análise, já que o sistema *AIMS 2* possui um algoritmo que desconsidera essas partículas que se tocam para evitar que elas sejam interpretadas pelo sistema como uma única partícula com propriedades diferentes.

O sistema *AIMS 2* forneceu como resultado informações de angularidade, esfericidade, características de achatamento e alongamento e textura para os agregados graúdos, ou seja, partículas medindo entre 4,750 mm e 37,500 mm, e angularidade e forma para os agregados medindo entre 0,075 mm e 4,750 mm.

Os agregados utilizados para compor as 6 misturas avaliadas nesta pesquisa foram analisados pelo sistema *AIMS 2* a fim de caracterizar as propriedades de forma, angularidade e textura. Para esta avaliação foram selecionados os agregados graúdos estudados (TMN 19.0 mm e TMN 9.5 mm), considerando-se toda a sua distribuição granulométrica. Na Tabela 8 estão descritos e classificados os principais parâmetros avaliados.

Tabela 8 - Propriedades e classificação dos parâmetros AIMS.

Propriedade	Valores/Classificação				
	Forma 2D	< 6,5	6,5 – 8,0	8,0 – 10,5	> 10,5
Circular		Semicircular	Semialongado	Alongado	-
Esfericidade	< 0,6	0,6 – 0,7	0,7 – 0,8	> 0,8	-
	Achatado/ Alongado	Baixa Esfericidade	Esfericidade Moderada	Alta Esfericidad e	-
Angularidade	< 2100	2100 – 4000	4000 – 5400	> 5400	-
	Arredondado	Subarredondado	Subangular	Angular	-
Textura Superficial	< 165	165 – 275	275 – 350	350 – 460	> 460
	Polido	Liso	Baixa Rugosidade	Rugosidade Moderada	Alta Rugosidade

Fonte: AL ROUSAN (2004)

3.2.1.9 Durabilidade

A avaliação da durabilidade dos agregados à desintegração química foi realizada de acordo com a norma DNIT ME 089/94. Os agregados selecionados a partir de peneiramento foram imersos em uma solução padronizada de sulfato de sódio (SO_4Na_2) por um período de 16 horas a 21 °C (± 1 °C). Após o período de imersão a amostra foi retirada da solução e colocada para secar a uma temperatura entre 105 °C e 110 °C e, após a secagem, a amostra foi esfriada até à temperatura ambiente.

O processo de imersão e secagem consiste em 5 ciclos de imersão em sulfato de sódio, aonde, no final de cada ciclo, a amostra foi lavada em solução de cloreto de bário e em água corrente. Por último a amostra foi passada na peneira correspondente e foi realizada a avaliação visual e do percentual em peso. O resultado desse ensaio é obtido observando-se o efeito, a ação e a quantidade de partículas afetadas pela solução.

Esse ensaio simula o efeito do intemperismo sobre os agregados, sendo possível avaliar o quanto esse agregado é susceptível a ação natural do tempo. As exigências normativas estabelecem que o desgaste ao ataque de sulfatos não deve ser superior a 12%.

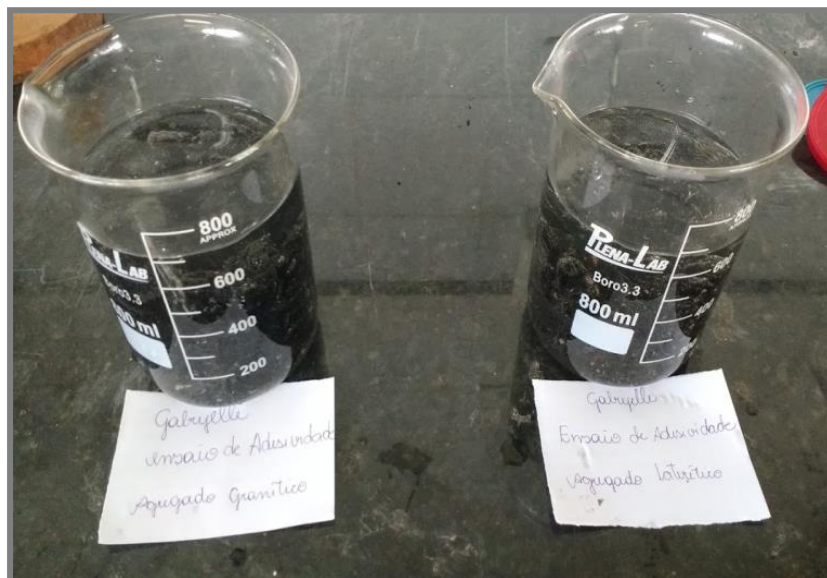
3.2.1.10 Adesividade

A aderência entre agregado e asfalto foi verificada por meio do deslocamento da película de asfalto que envolve a partícula de agregado, quando a mistura é submetida à ação da água após a imersão da mistura agregado asfalto em água (Figura 26), numa temperatura de 40°C por 72 horas. Esta verificação é estabelecida na norma DNIT ME 078/94.

A verificação dessa propriedade é importante para que avalie a condição do agregado quanto à película de asfalto e aplique-o de forma que não haja deslocamento da película pela ação da água.

Esse é um ensaio de avaliação visual, portanto deve-se verificar após 72 horas o recobrimento do ligante sobre o agregado. Caso não exista deslocamento da película de ligante, o agregado possui boa adesividade. Caso exista deslocamento parcial ou total da película de ligante, o agregado possui má adesividade.

Figura 26 - Ensaio de Adesividade.



3.2.1.11 Abrasão Los Angeles

Segundo as especificações da norma DNIT ME 035/98, esse é o ensaio que define o desgaste sofrido pelo agregado quando submetido às rotações da máquina de ensaio Los Angeles juntamente com uma carga abrasiva.

As rotações do tambor reproduzem o impacto sofrido pelo agregado durante a usinagem da mistura por meio da queda das esferas de ferro fundido sobre os agregados e da queda dos próprios agregados, uns sobre os outros, e simula o desgaste por meio do atrito dos agregados entre si e com as paredes do tambor.

O valor do desgaste é convencionalmente expresso pela porcentagem, em peso, do material passante, após o ensaio na peneira de malhas quadradas de 1,7mm ou peneira nº 12 da ABNT.

O agregado deve possuir dureza suficiente para resistir à degradação provocada pelos equipamentos de compactação, durante a construção do pavimento, e pela ação do tráfego e clima da região, durante a sua vida útil. E para isso as especificações do DNIT delimitam que para agregados a serem utilizados em camadas de base e revestimento de pavimentos o valor do desgaste à abrasão deve estar entre 40% e 55%.

3.2.2 Caracterização do Ligante Asfáltico

Para realização desta pesquisa foi utilizado ligante asfáltico CAP 50/70. A escolha deste tipo de CAP considerou o fato de ele ser o mais comumente utilizado na composição das misturas asfálticas no Brasil.

A fim de conhecer melhor as propriedades do ligante asfáltico utilizado, foram realizados ensaios de caracterização de acordo com as prescrições normativas. Os ensaios realizados para caracterização do ligante foram: penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional e envelhecimento da película de asfalto (RTFOT- *Rolling Thin Film Oven Test*).

O ensaio de penetração foi realizado de acordo com o prescrito na norma DNIT ME 155/10 e consistiu na medida, em décimo de milímetro, de uma agulha de massa

padronizada de 100g que penetrou uma amostra de cimento asfáltico com volume padronizado, à temperatura de 25°C durante 5 segundos.

O ensaio de ponto de amolecimento foi realizado de acordo com procedimentos da norma DNIT ME 131/10, utilizando o equipamento conhecido como anel e bola. Esse ensaio foi usado para determinar empiricamente a temperatura na qual o asfalto amoleceu quando aquecido sob certas condições particulares e atingiu uma determinada condição de escoamento.

Por meio do viscosímetro rotacional Brookfield, e seguindo o estabelecido na norma NBR 15184/05, mediu-se a viscosidade rotacional do ligante asfáltico por meio de um *splindle* (ponta de prova) em rotação constante, imersa em uma amostra do ligante, onde foi verificado o torque necessário para rotacionar o *splindle* sobre a amostra, a uma velocidade específica, nas temperaturas de 135°C, 150°C e 177°C. Nesse ensaio, a viscosidade rotacional foi uma medida da viscosidade dinâmica expressa em centipoise (cP).

O procedimento de envelhecimento da película de asfalto foi realizado de acordo com as recomendações da norma ASTM D2872-12. Tal processo foi executado a fim de avaliar o envelhecimento em curto prazo do ligante asfáltico, utilizando-se a estufa de filme fino rotativa (*Rolling Thin Film Oven*), simulando o efeito do calor e ar sobre uma película em movimento de materiais asfálticos semissólidos. Os efeitos desse tratamento foram determinados a partir de medições das propriedades selecionadas do asfalto antes e depois do teste. Após o procedimento foram realizados novamente os ensaios de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade rotacional, além do cálculo da perda de massa, a fim de avaliar os efeitos do envelhecimento a curto prazo.

O ligante utilizado nesta pesquisa foi classificado de acordo com as normas dos órgãos reguladores e atendeu às características que o enquadraram como um CAP 50/70. Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Resultados da caracterização do ligante asfáltico utilizado na pesquisa.

ENSAIO	UND	RESULTADO	LIMITE CAP 50/70	NORMA	
Penetração (100g, 5s, 25 °C)	0,1 mm	53,00	50 a 70	DNIT ME 155/10	
Ponto de Amolecimento	°C	47,25	46	DNIT ME 131/10	
Índice de Susceptibilidade Térmica	-	-1,78	(-1,5) a (+0,7)	--	
Viscosidade Rotacional	cP	135 °C, SP 21 mín, 20 rpm	348,80	274,00	NBR 15184/05
		150 °C, SP 21 mín	175,00	112,00	
		177 °C, SP 21 mín	74,80	57 - 285	
Ensaio no Resíduo Após RTFOT				ASTM 2872/12	
Varição em Massa	% massa	0,12	≤ 0,5	--	
Varição do Ponto de Amolecimento	°C	4,50	8,00	DNIT ME 131/10	
Penetração Retida	%	74,34	≥ 55,00	DNIT ME 155/10	

3.2.3 Seleção Granulométrica

Nesta pesquisa foram escolhidos três métodos de seleção granulométrica para avaliar a influência e aplicabilidade desses nas misturas asfálticas.

As partículas de agregados para compor as misturas da pesquisa foram selecionadas pelo método DNIT, por ser o mais usualmente aplicado no Brasil, pelo método Bailey e pelo método Francês. Posteriormente, as faixas selecionadas utilizadas nas misturas foram também avaliadas pelo método da FAD, a fim de verificar o intertravamento e a composição do esqueleto pétreo da mistura.

Os agregados foram enquadrados em faixas granulométricas, correspondente a cada método, para compor as misturas da pesquisa. A escolha foi feita considerando as características dos agregados em estudo, especialmente as características granulométricas, e também a aplicação das misturas em faixas de rolamento com resistência adequada à exigida pelos órgãos rodoviários brasileiros.

3.2.3.1 Método DNIT

Para estabelecer a faixa granulométrica mais adequada para aplicação nas misturas asfálticas de acordo com as especificações da pesquisa foram seguidos os procedimentos indicados pela norma DNIT 031/2006 – ES. Na aplicação do método do DNIT foram utilizados os dados de granulometria que restringiram a escolha da faixa C (Tabela 10).

Tabela 10 – Faixa C do DNIT, escolhida para utilização na Pesquisa (DNIT 031/2006 – ES).

Peneira de Malha Quadrada		FAIXA	
		Porcentagem em massa passando	
Série ASTM	Abertura [mm]	C	Tolerância
2''	50,8	-	-
1 ^{1/2} ''	38,1	-	± 7%
1''	25,4	-	± 7%
^{3/4} ''	19,1	100	± 7%
^{1/2} ''	12,7	80-100	± 7%
3/8''	9,5	70-90	± 7%
Nº 4	4,8	44-72	± 5%
Nº 10	2,0	22-50	± 5%
Nº 40	0,42	8-26	± 5%
Nº 80	0,18	4-16	± 5%
Nº 200	0,075	2-10	± 2%
Teor de Asfalto %		4,5 a 9,0	± 0,3%
Tipo de Camada de Revestimento Asfáltico		Camada de Rolamento	-

Fonte: BERNUCCI *et al.* (2010)

3.2.3.2 Método Bailey

De posse dos resultados de caracterização dos agregados buscou-se obter uma mistura que atendesse aos parâmetros e recomendações do método Bailey. O método Bailey foi utilizado para selecionar misturas com distribuição granulométrica de agregados adequada, de forma que atendessem aos parâmetros estabelecidos e fornecessem um esqueleto mineral resistente para ser aplicado nas misturas asfálticas.

Com o objetivo de realizar a seleção granulométrica dos agregados em estudo a partir da metodologia Bailey, foram seguidas basicamente as seguintes etapas: primeiramente definiu-se a massa específica escolhida, determinando desta forma o intertravamento do agregado graúdo; a seguir determinaram-se as proporções de Agregado Graúdo (AG), Agregado Graúdo no Agregado Fino (GAF) e Finos no Agregado Fino (FAF).

A partir desse método foram selecionadas duas misturas: uma utilizando agregados graníticos e outra utilizando agregados lateríticos. Para isso, foram consideradas as

granulometrias dos agregados pesquisados e as proporções de partículas graúdas e de partículas finas destas. As porcentagens de agregados graúdos e finos de cada mistura foram ajustadas até que os limites especificados fossem atingidos, de modo que os parâmetros Bailey pudessem ser atendidos.

Na Tabela 11 estão apresentados os parâmetros, seus limites e os valores obtidos para cada mistura selecionada granulometricamente por este método.

Tabela 11 - Parâmetros da seleção granulométrica obtidos pelo método Bailey.

Parâmetro Mistura	AG	GAF	FAF
Agregados Graníticos	0,69	0,50	0,37
Agregados Lateríticos	0,68	0,64	0,36
Limite	0,60 – 0,75	0,35 – 0,50	0,35 – 0,50

Observa-se que, para a mistura utilizando os agregados graníticos, todos os parâmetros foram atendidos. No entanto, para a mistura dos agregados lateríticos, o parâmetro GAF ficou acima do estabelecido pelo método; a quantidade elevada de fino presente nessa mistura já era um indicio da dificuldade de enquadrá-la nesse parâmetro.

Valores elevados de GAF representam um baixo valor de Vazios no Agregado Mineral (VAM), além de tendenciar a mistura à deformabilidade e menor permeabilidade. Denneman *et al.* (2007) defendem que misturas asfálticas com quantidade elevada de finos na granulometria graúda tendem a apresentar pior desempenho quanto à deformação permanente, uma vez que os agregados finos apenas flutuam na estrutura e não compõem o esqueleto mineral, responsável em transmitir as cargas na estrutura.

3.2.3.2.1 Propriedades de Compactação

No método Bailey foram utilizadas propriedades específicas de compactação que consideraram os vazios deixados pelo arranjo dos agregados. Essas propriedades foram avaliadas a fim de garantir que o esqueleto pétreo utilizado na mistura fosse capaz de resistir de forma mais eficiente possível aos esforços aos quais a mistura seria submetida.

Massa Específica Solta e Compactada dos Agregados

Massa Específica Solta do Agregado Graúdo

O ensaio foi realizado de acordo com a norma AASHTO T-19/2014. Nesse ensaio, os agregados foram colocados em um recipiente de volume conhecido sem qualquer esforço de compactação (Figura 27). O resultado foi obtido ao se dividir a massa de agregado pelo volume do recipiente, obtendo-se a massa específica solta. O volume de vazios na condição solta, aquela em que os agregados estão em mínimo contato, foi obtido por meio da massa específica e da massa específica solta.

Figura 27 – Determinação da Massa Específica Solta do Agregado Graúdo.



FONTE: VAVRIK *et al.* (2002).

Massa Específica Compactada do Agregado Graúdo

A determinação da massa específica compactada foi realizada segundo procedimento da AASHTO T-19/2014. Nesse ensaio os agregados foram colocados em um recipiente de volume conhecido, divididos em camadas que foram submetidas ao esforço de golpes de compactação a fim de reduzir os vazios entre as partículas, aumentando o contato entre os grãos (Figura 28). A determinação ocorreu pela divisão entre a massa de agregado e o volume do recipiente. Nessa condição, os agregados se encontravam em maior contato provocado pelo esforço de compactação, e seu volume de vazios pôde ser determinado pela massa específica compactada e a massa específica aparente.

Figura 28 - Determinação da Massa Específica Compactada do Agregado Graúdo

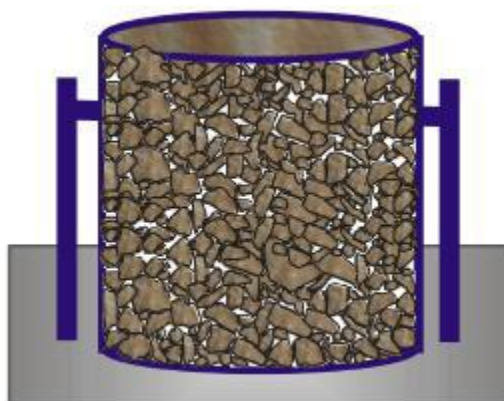


FONTE: VAVRIK *et al.* (2002).

Massa Específica Compactada do Agregado Fino

A massa específica compactada dos agregados finos foi determinada de acordo com a norma AASHTO-19/2009, a partir do preenchimento de um recipiente cilíndrico de volume conhecido e aplicação de golpes para compactação do mesmo. No ensaio foi utilizado o cilindro proctor de 100mm de diâmetro e a massa específica compactada dos agregados finos foi determinada a partir da divisão entre a massa dos agregados e o volume do recipiente. A Figura 29 ilustra a determinação da massa específica compactada dos agregados finos.

Figura 29 - Determinação da Massa Específica Compactada do Agregado fino.



FONTE: VAVRIK *et al.* (2002).

3.2.3.3 Método Francês

No método Francês a etapa inicial de seleção de misturas novas, nível 0, é constituída pela composição dos esqueletos pétreos. Nesse método há a peculiaridade de que não são adotadas faixas granulométricas, mas curvas de partida especificadas para cada tipo de mistura.

O método Francês é utilizado na maioria das misturas asfálticas da Europa, e cada país adota faixas granulométricas que se enquadram nas curvas de partida e atendem as necessidades dos projetos locais. Desse modo, para que fosse possível aplicar o método nesta pesquisa, foi necessário avaliar faixas granulométricas utilizadas comumente na Europa aplicando a metodologia proposta pelo método Francês.

Após analisar as faixas granulométricas utilizadas nos países europeus e condições de tráfego e serviço a que eram destinadas, optou-se por utilizar a curva granulométrica do tópico 14.03.2.2.4, presente na norma portuguesa NP14.03/2014. Essa norma apresenta faixas granulométricas para distintas aplicações e que atendem às exigências do método Francês, optou-se pela utilização da curva do tópico 14.03.2.2.4 uma vez que tem características que proporcionam o comparativo com os outros métodos estudados.

Na Tabela 12 está a curva granulométrica do tópico 14.03.2.2.4, presente na norma portuguesa NP14.03/2014. Essa curva foi escolhida considerando a granulometria dos agregados em estudo, bem como a necessidade de se obter uma mistura com resistência adequada ao comparativo com os outros métodos em análise. Foi observado também o fato de que a mistura deveria resistir aos esforços, descartando assim as rubricas que compunham faixas para misturas de regularização do pavimento.

Tabela 12 – Tópico 14.03.2.2.4, faixa de agregados utilizada na pesquisa.

Peneira de Malha Quadrada		FAIXA
		Porcentagem em massa passando
Série ASTM	Abertura [mm]	14.03.2.2.4
2"	50,8	-
1 1/2"	38,1	-
1"	25,4	-
3/4"	19,1	100
1/2"	12,7	90-100
3/8"	9,5	67-77
Nº 4	4,8	40-52
Nº 10	2,0	25-40
Nº 40	0,42	11-19
Nº 80	0,18	6-10
Nº 200	0,075	5-8

Fonte: NP14.03/2014

3.2.4 Análise da FAD

A identificação da FAD foi realizada inicialmente pela determinação do diagrama de interação, o qual indica quais peneiras estão interagindo. Uma vez identificados os agregados da FAD, a porosidade pôde ser calculada. Para determinar o diagrama de interação e calcular a porosidade das misturas em estudo foram seguidos os procedimentos adotados por Kim *et al.* (2009), Bastos (2016) e Ferreira (2017). O diagrama de interação foi feito com base na análise do espaçamento entre as partículas na superfície intersticial.

A análise pelo método de Faixa de Agregados Dominantes (FAD) permitiu avaliar a estrutura granulométrica das misturas asfálticas da pesquisa. O objetivo dessa análise foi verificar se a composição dos esqueletos pétreos escolhidos conferia estabilidade e resistência à deformação permanente. Para realizar esta verificação, compararam-se as porosidades das FAD determinadas com os Flow Number obtidos para cada mistura.

3.2.5 Dosagem e Compactação das Misturas

Após realização da seleção granulométrica pelos métodos DNIT, Bailey e Francês, obteve-se um total de seis misturas distintas, sendo três compostas por agregados graníticos e as demais por agregados lateríticos.

Com o objetivo de determinar o teor ótimo de ligante para as misturas estudadas, foi realizada a dosagem e compactação pelo método SUPERPAVE.

3.2.6 Propriedades das Misturas Asfálticas

Os ensaios mecânicos foram realizados para avaliar o comportamento das misturas da pesquisa. Além dos ensaios mecânicos, foi realizado também o ensaio de escorrimento a fim de verificar e comprovar que as misturas estudadas não necessitavam de aditivos estabilizadores e se enquadravam como misturas convencionais.

A necessidade de realização do ensaio de escorrimento surgiu do fato de que as misturas utilizando agregados lateríticos necessitaram de um teor de ligante superior ao convencionalmente utilizado. Tal fato se justificou com a alta absorção apresentada pelos agregados. Outro motivo que reforçou a necessidade do teste de escorrimento foi o fato das misturas terem necessitado de um maior teor de fíler, teor esse necessário para que fosse possível enquadrá-las nas faixas granulométricas escolhidas.

A determinação das propriedades mecânicas das misturas estudadas foi realizada a partir dos ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT), Estabilidade Marshall, Dano por Umidade Induzida (LOTTMAN Modificado), Módulo de Resiliência (MR), Cântabro, Fadiga por Compressão Diametral à Tensão Controlada, Módulo Dinâmico ($|E^*|$) e *Flow Number* (Resistência à Deformação Permanente).

3.2.6.1 Sensibilidade ao Escorrimento

A fim de avaliar a sensibilidade ao escorrimento das misturas estudadas, foi realizado ensaio seguindo as recomendações da norma AASHTO T 305/97. O escorrimento ou gotejamento da mistura é a porção de material que se separa da amostra total e é depositada fora do cesto de arame durante o ensaio, podendo este material drenado ser o ligante ou uma combinação de ligante, aditivos e/ou agregados miúdos e finos. A norma estabelece que a porcentagem máxima de escorrimento em relação ao peso total da amostra não deve ultrapassar 0,3%.

Para a realização do ensaio de escorrimento, os agregados foram aquecidos a 165°C e o ligante a 150°C, realizou-se o procedimento de mistura dos materiais (Figura 30) e em seguida as misturas sem compactação foram colocadas sem perturbação e sem consolidação em cestos de arame, previamente pesados vazios (A). O procedimento seguinte foi pesar o conjunto cesto + amostra (B) que foi posicionado sobre o prato vazio (C) que também foi previamente pesado, a seguir o conjunto foi levado à estufa e aquecido a 165°C. Os procedimentos do ensaio estão ilustrados na Figura 31.

As amostras ficaram em estufa durante 70 ± 5 min conforme recomendações da norma, após esse período o conjunto cesto + amostra + prato foi retirado da estufa e foi realizada a pesagem do prato com o material drenado (Figura 32).

O resultado do ensaio foi calculado a partir da equação 4.

$$\text{Escorrimento}(\%) = \frac{D-C}{B-A} \times 100 \quad (\text{eq. 4})$$

Onde:

A: massa do cesto de arame vazio;

B: massa do cesto de arame + amostra;

C: massa do recipiente vazio;

D: massa do recipiente + material drenado.

Figura 30 - Misturas realizadas para execução do ensaio de escorrimento.

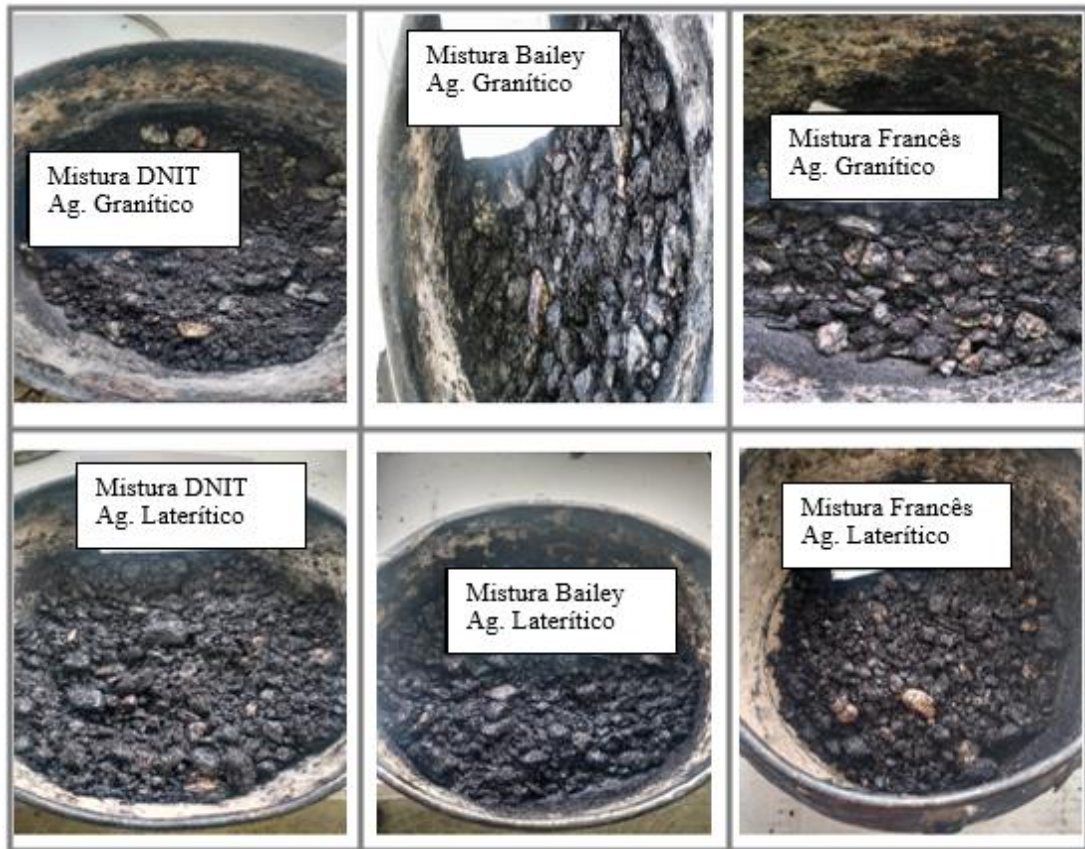


Figura 31 - Procedimentos de realização do ensaio de escorrimento.



Figura 32 - Prato com amostra drenada após ensaio.



3.2.6.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT)

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral verifica a tensão suportada pela mistura asfáltica compactada até que ocorra a ruptura. Esse ensaio foi realizado de acordo com a norma DNIT ME 136/10 e considerou a aplicação de duas forças de compressão diametralmente opostas em um corpo de prova cilíndrico (Figura 33), essas forças geram ao longo do diâmetro solicitado tensões de tração uniformes perpendicularmente a esse diâmetro.

O corpo de prova foi submetido a um carregamento constante com velocidade de $0,8 \pm 0,1$ mm/s, até que ocorresse a ruptura (Figura 34).

Figura 33 - Esquema de aplicação da compressão diametral.

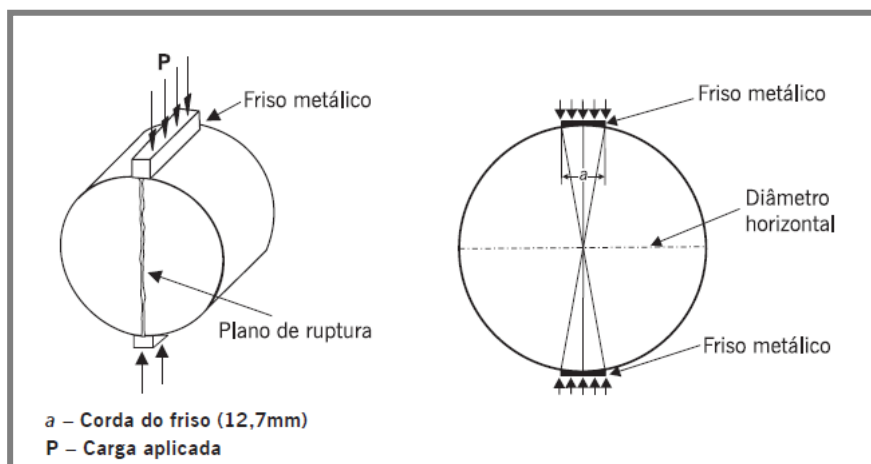


Figura 34 - Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral.



A resistência à tração dos corpos de prova ensaiados foi calculada a partir da equação 5.

$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi DH} \quad (\text{eq.5})$$

Onde:

σ_t : resistência à tração

F: carga de ruptura

D: diâmetro do corpo de prova

H: altura do corpo de prova

O resultado final foi a média de pelo menos 3 resultados, expresso em MPa.

3.2.6.3 Estabilidade Marshall

O ensaio de estabilidade Marshall mede, de forma indireta, a resistência ao cisalhamento e o intertravamento das partículas gerado a partir do atrito interno entre os grãos e a coesão da mistura.

Esse ensaio foi executado de acordo com a norma DNIT ME 043/95. Para realização desse ensaio os corpos de prova de 1200g foram submetidos a banho Maria numa temperatura de 60°C por um período de 30 a 40 minutos, e em seguida foram colocados no molde de ruptura e levados a prensa Marshall (Figura 35) na qual foram submetidos a uma carga de compressão aplicada por meio dos cabeçotes curvos padronizados com taxa de carregamento de 5 cm/min até que ocorresse a ruptura.

A carga máxima suportada pelo corpo de prova até a ruptura é denominada estabilidade Marshall. Foram realizadas três medidas para cada mistura e o resultado foi a média dos três resultados expresso em kgf.

Figura 35 - Ensaio de Estabilidade Marshall.



3.2.6.4 Dano por Umidade Induzida (*LOTTMAN Modificado*)

O ensaio de dano por umidade induzida foi realizado com o intuito de avaliar uma medida indireta da adesividade e coesão da mistura asfáltica para corpos de prova saturados e não saturados, condicionados e não condicionados. Esse ensaio verifica a sensibilidade à água de corpos de prova de misturas asfálticas, avaliando-se a adesividade agregado ligante e a coesão da mistura em condições resultantes de saturação e de condicionamento acelerado em presença de água.

O comprometimento das propriedades mecânicas da mistura asfáltica é denominado dano por umidade induzida e refere-se à relação entre a resistência à tração das amostras condicionadas e a resistência à tração das amostras em condições normais (não condicionadas). Para esta pesquisa o ensaio foi realizado de acordo com as prescrições da norma AASHTO T 283/2002 com o intuito de avaliar os danos causados pela umidade.

Foram moldados 6 corpos de prova com volume de vazios de $7 \pm 0,5\%$ para cada mistura selecionada. Desses, 3 corpos de prova de cada mistura foram submetidos ao condicionamento. Em um recipiente com água, aplicou-se um vácuo até obter-se 70 a 80% de saturação, em seguida, os corpos de prova saturados foram colocados em sacos plásticos individuais com 10 ml de água, vedando-os e levando logo em seguida ao congelamento a uma temperatura de -18°C por um período de 16 horas. Após esse período, mergulhou-se os corpos de prova ainda nos sacos plásticos em um banho a 60°C por 24 horas.

Passado o período de 24 horas, tanto o grupo de corpo de prova condicionado quanto o grupo não condicionado foram submetidos a um banho de 25°C para ajuste da temperatura, em seguida todos foram submetidos ao ensaio de resistência à tração na prensa Marshall, obtendo-se assim a resistência à tração condicionada (RTc) para os corpos de prova que sofrem condicionamento, e a resistência à tração não condicionada (RT) para os corpos de prova que não sofreram condicionamento. O cálculo do dano por umidade induzida é chamado de resistência à tração retida (RRT) e é dado pela razão entre o valor da RTc e a RT, sendo estes uma média dos três valores ensaiados. O procedimento foi realizado conforme ilustra a Figura 36.

Figura 36 - Procedimento do ensaio de Lottman modificado.



3.2.6.5 Cântabro

Para avaliar a resistência a degradação das misturas desta pesquisa, realizou-se o ensaio Cântabro segundo as recomendações da norma DNIT ME 383/99. Esse ensaio consistiu da avaliação da perda por desgaste das misturas submetidas ao aparelho Los Angeles.

Para cada mistura foram moldados corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro por aproximadamente 6,5cm de altura. Esses corpos de prova foram pesados (P), colocados individualmente no aparelho Los Angeles e submetidos a 300 revoluções na velocidade angular de 30rpm. Após este processo, os corpos de prova foram retirados do tambor e pesados novamente (P').

O cálculo do desgaste sofrido pela mistura (A) foi feito a partir da equação 6:

$$A = \frac{P-P'}{P} \times 100 \quad (\text{eq.6})$$

A Figura 37 apresenta o equipamento utilizado e o aspecto de um corpo de prova, antes e após a realização do ensaio.

Figura 37 - Equipamento utilizado e aspecto do corpo de prova antes e após realização do ensaio de Cântabro.



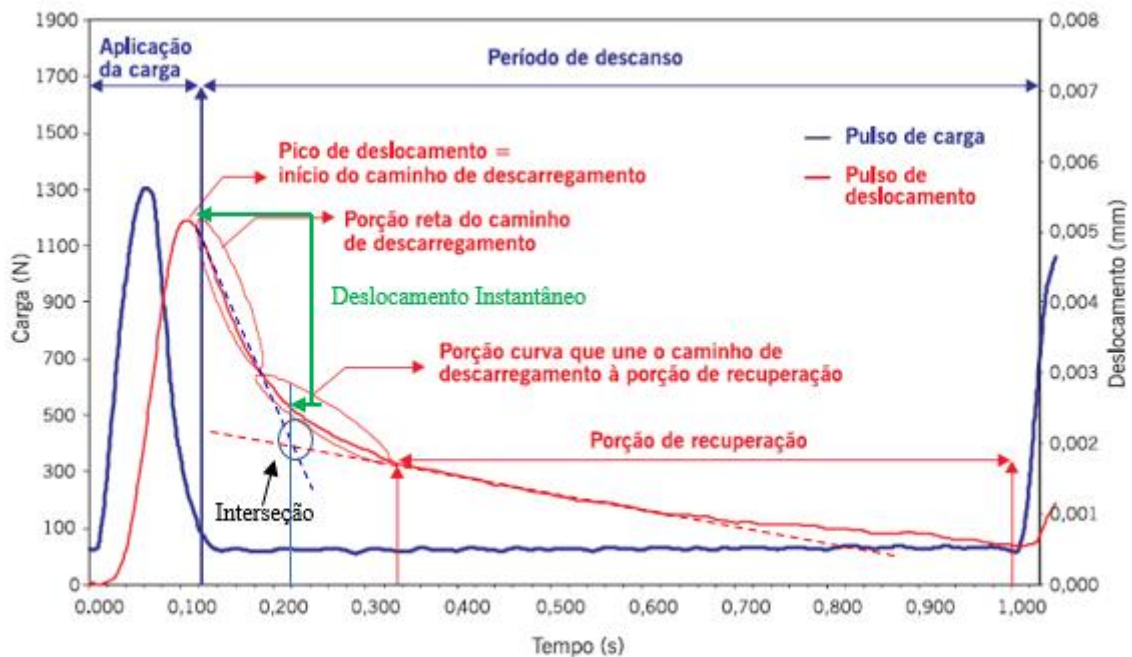
3.2.6.6 Módulo de Resiliência (MR)

As deformações recuperáveis das camadas de pavimento quando submetido a carregamentos repetidos são conhecidas como deformações resilientes. Para que seja possível avaliar a capacidade de recuperação elástica, bem como o suporte à deformabilidade, é necessário conhecer os módulos resilientes das camadas que compõem o pavimento.

A fim de avaliar a capacidade resiliente das misturas da pesquisa, foram realizados ensaios de módulo de resiliência seguindo os procedimentos estabelecidos pela norma NBR 16018/11. Os ensaios foram realizados na prensa hidráulica UTM-25 da IPC na qual os corpos de prova cilíndricos de aproximadamente 10 cm de diâmetro por 6,5 cm de altura foram posicionados em um molde e, em seguida, foi aplicada uma carga compressiva em formato de onda pulsante. Essa carga gerou uma tensão de tração transversalmente ao plano de aplicação, sendo então medido o deslocamento diametral recuperável na direção horizontal correspondente à tensão gerada.

Nesse procedimento de ensaio, os deslocamentos considerados são os recuperáveis (resilientes). A norma NBR 16018/2011 computa o deslocamento resiliente instantâneo, que é calculado usando a deformação horizontal recuperável que ocorre durante a fase de descarregamento de um ciclo de carga-descarga, sendo igual ao valor resultante do ponto na curva hiperbólica correspondente ao tempo coordenado (valor no eixo x) da interseção subtraído do pico de deslocamento (Figura 38).

Figura 38 - Deslocamentos resilientes instantâneos.



Fonte: Adaptado de BERNUCCI *et al.* (2010)

Estudos como o de Daibert (2015) explicam que a temperatura exerce importante influência no comportamento das misturas asfálticas especialmente no módulo de resiliência das mesmas. Motta (1993) explica ainda que as variações de temperatura de 10 a 35°C podem alterar os valores de módulo de resiliência em até 12 vezes para o CAP 50/70 e até 4 vezes para o CAP 30/45.

Desse modo, a fim de avaliar a susceptibilidade do módulo de resiliência das misturas ensaiadas, quando submetidas a variações de temperatura, foram realizados ensaios a 4°C, 21°C, 25°C (Temperatura ambiente) e 37°C. Essas temperaturas foram escolhidas a fim de obter um parâmetro para avaliação junto ao ensaio de Módulo Dinâmico, que também foi realizado na pesquisa com essas mesmas temperaturas.

O procedimento para realização do ensaio consistiu na aplicação de uma carga igual a 10% do valor da resistência à tração, numa frequência de 60 ciclos por minuto (1Hz), com tempo de aplicação de 0,10 segundo e, portanto, 0,90 segundo de repouso ou descarregamento.

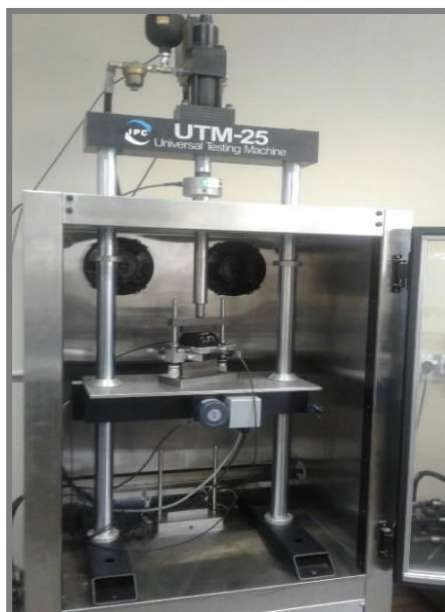
3.2.6.7 Fadiga por Compressão Diametral à Tensão Controlada

No Brasil ainda não existe procedimento normativo regulamentado para realização do ensaio de fadiga. No entanto, o ensaio tradicional de vida de fadiga para determinação do número de repetições de carga geralmente é realizado por compressão diametral à tensão controlada com carga de 1Hz, aplicada por meio de um equipamento pneumático.

Desse modo, é possível determinar o número de ciclos de carga, aplicada em forma de pulsos que são necessários para provocar a falha de amostras cilíndricas em níveis de tensão predefinidos. A partir dos resultados pode-se proceder a construção da curva de Whöler (que é um gráfico de magnitude de tensão por número de ciclos (N), em escala logarítmica). Segundo Pazos (2015) a vida de fadiga de um material pode ser entendida como o número de ciclos que levam o corpo de prova à ruptura.

Para realização dos ensaios de vida de fadiga das misturas da pesquisa utilizou-se a prensa UTM-25 (Figura 39), para aplicação de carga por compressão diametral à tensão controlada, numa frequência de pulso de 1 Hz, sendo 0,1s para a aplicação da carga senoidal e 0,9s de repouso. O ensaio foi realizado a temperatura de 25°C e foram adotados os níveis de tensão proporcionais à resistência à tração de cada mistura, obedecendo à capacidade máxima do equipamento que é de 5000N.

Figura 39 - Prensa UTM-25 utilizada para realização do ensaio de fadiga.



Dessa forma, cada mistura teve níveis de tensão distintos que foram determinados de acordo com o valor da resistência à tração previamente ensaiada. Destaca-se que os níveis de tensão utilizados para os corpos de prova selecionados granulometricamente pela metodologia Bailey foram superiores aos utilizados para as metodologias DNIT e Francês, tal condição ocorre devido os valores de resistência à tração apresentados para esses corpos de prova terem sido inferiores, uma vez que os níveis de tensão são determinados como percentuais da RT e não podem ultrapassar 5000N (limite do equipamento).

Na Tabela 13 estão apresentados os valores dos níveis de tensão (em porcentagem da RT) adotados para cada mistura. Para esta pesquisa o critério de parada adotado foi a deformação de 4 mm do corpo de prova, tendo em vista que esse é o valor mais usual em pesquisas brasileiras.

Tabela 13 - Níveis de tensão adotados para realização dos ensaios de fadiga.

Método de Seleção Granulométrica	Método DNIT		Método Bailey		Método Francês	
	Granítico	Laterítico	Granítico	Laterítico	Granítico	Laterítico
Tipo de Agregado						
Níveis de Tensão	37%	47%	72%	52%	45%	41%
	35%	45%	70%	50%	43%	39%
	33%	43%	68%	48%	41%	37%
	31%	41%	66%	46%	39%	35%
	29%	39%	64%	44%	37%	33%
	27%	37%	62%	42%	35%	31%

Observa-se na Tabela 13 que houve variação de até 35% nos níveis de tensão para as misturas utilizando agregados graníticos e até 11% para as que utilizaram agregados lateríticos. Conforme enfatizado tais diferenças são oriundas das diferenças de tensão obtidas para a RT uma vez que a tensão aplicada no ensaio de fadiga é calculada como um percentual desses resultados. Como o equipamento apresenta a limitação de suporte de carga valores inferiores de RT permitem maior percentual possível para aplicação da carga do ensaio de fadiga ocasionando essa discrepância de valores percentuais mas que na realidade implicam em cargas semelhantes para aplicação.

A vida de fadiga das misturas asfálticas estudadas foi expressa em função da diferença de tensões ($\Delta\sigma$) entre a tensão de tração e de compressão e em função do parâmetro ε_i (deformação resiliente), calculados por meio das Equações 7 e 8.

$$\Delta\sigma = \frac{8F}{100\pi dh} \quad (\text{eq.7})$$

$$\varepsilon_i = \frac{(\%RT)}{MR} \quad (\text{eq.8})$$

Onde:

$\Delta\sigma$: diferença de tensões no centro do corpo de prova (MPa);

ε_i : deformação resiliente específica;

F: carga aplicada (N);

d: diâmetro do corpo de prova (cm);

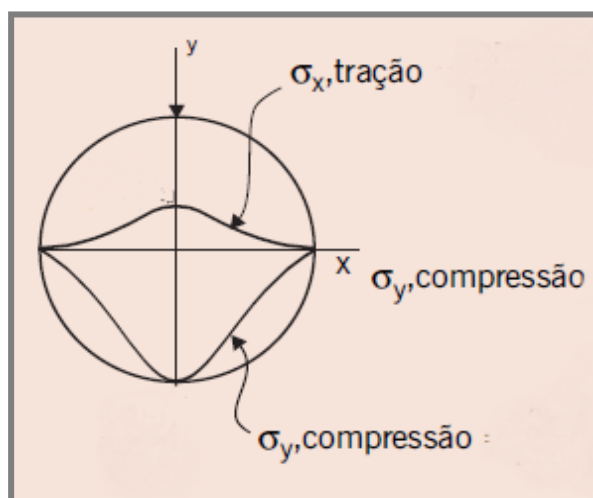
h: altura do corpo de prova (cm);

RT: resistência à tração (MPa);

MR: módulo de resiliência (MPa);

A Figura 40 ilustra o estado de tensões do corpo de prova ao ser submetido a compressão diametral.

Figura 40 - Estado de tensões de um corpo de prova submetido à compressão diametral



Fonte: Adaptado de BERNUCCI *et al.* (2010)

Com o auxílio do programa Microsoft Excel®, em gráficos dilog, projetou-se as curvas de fadiga $\Delta\sigma \times N$ e $\varepsilon_i \times N$ para cada uma das misturas, a partir das quais foi possível determinar as relações entre o número de repetições à ruptura e nível de tensão atuante bem como as equações correspondentes a cada mistura, equivalentes às Equações 9 e 10.

$$N = K_1 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{n_1} \quad (\text{eq.9})$$

$$N = K_2 \left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{n_2} \quad (\text{eq.10})$$

Onde:

N= número de aplicações de carga na ruptura, no fim do ensaio;

$\Delta\sigma$ = diferença de tensões no centro do corpo de prova (MPa);

K1; n1; K2 e n2 = parâmetros determinados no ensaio;

3.2.6.8 Módulo Dinâmico ($|E^*|$)

A teoria da viscoelasticidade tem sido considerada como uma alternativa mais robusta e representativa, pois modela características importantes do material como a fluência, à relaxação de tensões; a dependência do tempo, da temperatura e do histórico de carregamento. Em laboratório, a propriedade viscoelástica fundamental que é tipicamente determinada é o módulo complexo, também denominado módulo dinâmico.

O módulo dinâmico ($|E^*|$) é o valor normal do módulo complexo, calculado dividindo-se a máxima tensão (pico a pico) pela deformação axial recuperável (pico a pico) para um material sujeito a uma carga senoidal. O ensaio de módulo dinâmico, semelhantemente ao ensaio de módulo de resiliência, fornece uma estimativa da rigidez da mistura asfáltica.

Para determinação do módulo dinâmico das misturas da pesquisa realizou-se ensaios de acordo com a norma AASHTO TP-62/2009. O ensaio consistiu na aplicação de uma tensão uniaxial de compressão senoidal em um corpo de prova de 150mm de altura por 100mm de diâmetro, em temperaturas e frequências de carga especificadas pela norma. A

tensão aplicada e a deformação axial recuperável resultante da amostra foram medidas e usadas para o cálculo do módulo dinâmico.

Para obtenção das curvas mestra, a partir das quais foi possível realizar a avaliação do desempenho da mistura, foram realizados ensaios às temperaturas de 4; 21 e 37°C, com frequências de 0,1; 0,5; 1,0; 5,0; 10,0 e 25,0 Hz para cada temperatura.

Os corpos de prova, individualmente equipados com LVDTs, foram testados para cada uma das 18 combinações de temperatura e frequência de carregamento, começando com a temperatura mais alta e procedendo para a mais baixa. Para cada temperatura foi aplicada uma carga de contato ($P_{mín}$) diferente, igual a 5% de um valor típico de carga dinâmica, geralmente verificado em cada temperatura, conforme apresentado na Tabela 14.

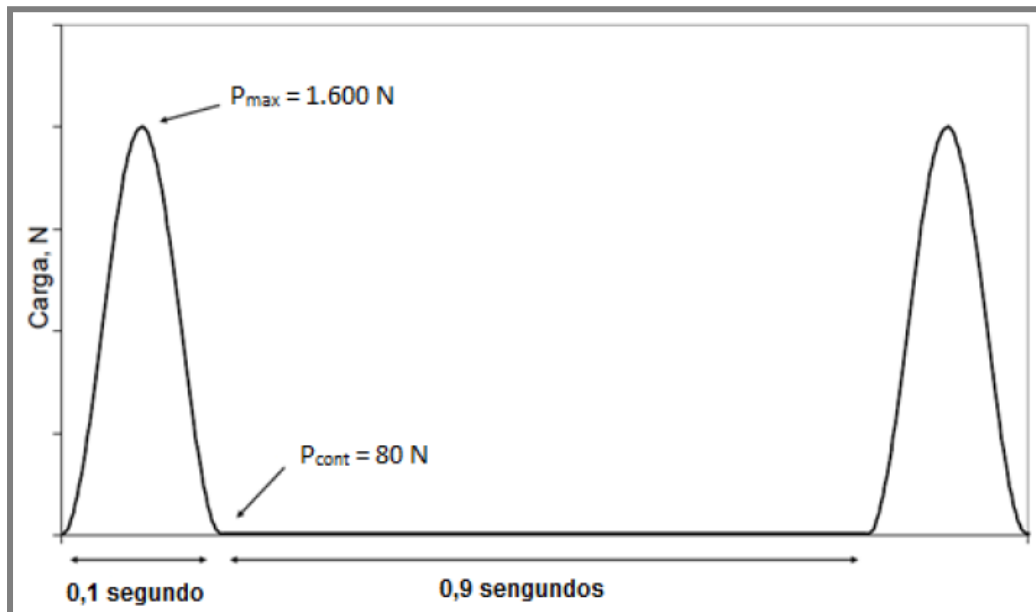
Tabela 14 - Carga contato utilizada para cada temperatura do ensaio de módulo dinâmico.

Temperatura [°C]	Carga de Contato ($P_{mín}$) [kPa]
4	700
21	350
37	140

3.2.6.9 *Flow Number* (Resistência à Deformação Permanente)

Neste ensaio, a mistura asfáltica é submetida a um carregamento cíclico de compressão uniaxial, e a deformação permanente acumulada é obtida em função do número de ciclos. O ciclo consiste de um pulso *haversine* de 0,1 s no qual ocorre o carregamento máximo de 1,6 kN seguido por um repouso de 0,9 s, onde atua a carga de contato de 80 kN, esse comportamento está ilustrado na Figura 41. Esse ensaio simula o efeito da passagem dos veículos repetidamente sobre o pavimento e fornece como resposta o *flow Number* (FN), que é o número de ciclos tolerável antes que ocorra fluência.

Figura 41 - Carregamento aplicado no ensaio uniaxial de carga repetida a 60°C.



Fonte: Adaptado de Nascimento (2008).

Para avaliação das misturas da pesquisa, o teste foi realizado na AMPT, numa temperatura de 60 °C e ciclos de carga uniaxial compressiva de 200 kPa, aplicados no corpo de prova de 150 mm de altura e 10 mm de diâmetro, dosado segundo a metodologia SUPERPAVE com $7 \pm 0,5\%$ de volume de vazios. Para a obtenção desse volume de vazios foram realizadas tentativas com mudanças do número de giros no compactador giratório, até que esse critério fosse obedecido. Logo, o número de giros necessários para obter misturas com volume de vazios igual a $7 \pm 0,5\%$ foi 25 giros.

O critério de parada para o ensaio foi o alcance de 10.000 ciclos ou uma deformação de 50.000 *microstrains*. Quando o ensaio atingiu uma das duas condições, foi dado por encerrado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo estão apresentados os resultados obtidos durante a pesquisa, bem como a análise e avaliação desses. Estão expostas juntamente com a discussão dos valores obtidos a caracterização dos agregados, a caracterização do ligante asfáltico, os parâmetros de dosagem e compactação das misturas e a caracterização das misturas.

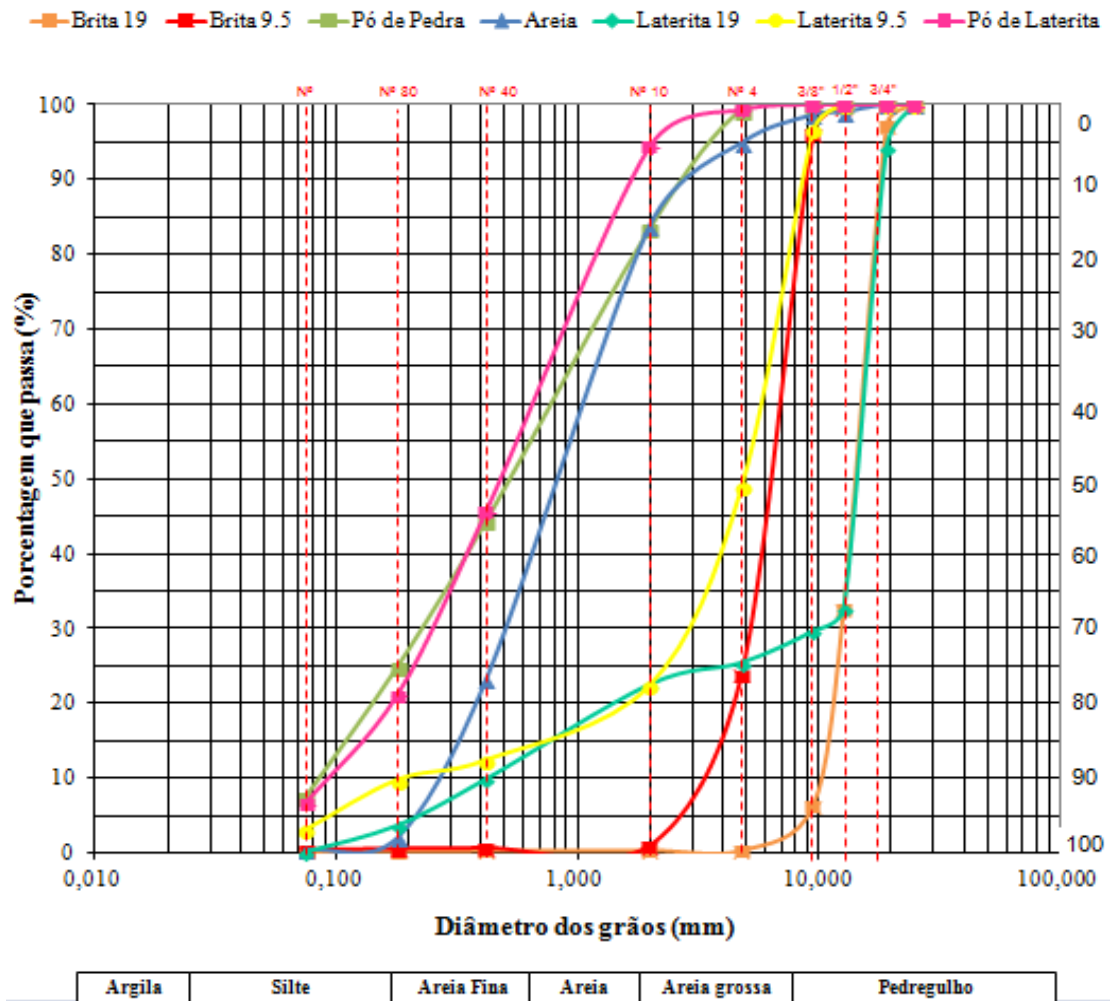
4.1 Caracterização dos Agregados

Nos tópicos subsequentes estão apresentados os resultados e análises dos ensaios realizados para caracterização dos agregados utilizados na pesquisa.

4.1.1 Distribuição Granulométrica

Após realização do processo de peneiramento, conforme prescreve a norma, foi possível obter os quantitativos passante e retido em cada peneira e assim gerar o gráfico que representa as curvas granulométricas de cada agregado ensaiado. Na Figura 42 estão ilustradas as curvas de distribuição granulométrica de todos os agregados utilizados na pesquisa.

Figura 42 - Curvas de distribuição granulométrica dos agregados da pesquisa.



Avaliando as curvas da Figura 44 é possível inferir que os agregados graúdos de origem granítica têm uma distribuição granulométrica mais uniforme que a dos agregados graúdos de origem laterítica. Esse fato pode ser explicado pela sensibilidade ao desgaste que a laterita apresenta e que faz com que os grãos se desintegram pelo simples atrito grão a grão, diminuindo de tamanho, passando a preencher outros intervalos na distribuição granulométrica. Outro aspecto a ser observado no comparativo entre as curvas é o fato de que os agregados lateríticos apresentam uma porcentagem de finos superior à dos agregados graníticos, fazendo com que haja partículas retidas com diâmetros menores.

Nas curvas que representam os agregados miúdos, observa-se um comportamento semelhante para o pó de pedra e pó de laterita, pois ambos apresentam graduação densa e

mais concentrada em poucos intervalos, com porcentagem elevada de finos. A curva da areia tem distribuição mais contínua, apresentando grãos maiores e quantidade razoável de finos.

4.1.2 Massa Específica e Absorção

Na Tabela 15 estão apresentados os resultados de massa específica real, massa específica aparente e absorção dos agregados utilizados na pesquisa. Observa-se que os agregados lateríticos apresentam valores de massa específica superiores aos apresentados pelos agregados graníticos, o que pode ser explicado, dentre outros motivos, pela composição mineralógica rica em minerais ferrosos das lateritas.

Tabela 15 - Resultados dos ensaios de massa específica e absorção dos agregados.

Agregado		Massa Específica Real (g/cm ³)	Massa Específica Aparente (g/cm ³)	Absorção (%)	
				Obtida	Máx. Permitida
Agregado Graúdo	Brita Granítica 19.0 mm	2,846	2,811	0,44	2,00
	Brita Granítica 9.5 mm	2,787	2,722	0,85	2,00
	Brita Laterítica 19.0 mm	3,012	2,600	5,26	2,00
	Brita Laterítica 9.5 mm	3,095	2,634	5,67	2,00
Agregado Miúdo	Areia	2,475	2,456	0,30	--
	Pó de Pedra	2,516	2,508	0,14	--
	Pó de Laterita	2,565	2,310	4,14	--

Analisando os valores obtidos para absorção, tem-se que os agregados graníticos atendem às exigências dos órgãos rodoviários, enquanto os agregados lateríticos apresentam valores acima do exigido. Bernucci *et al.* (2010) explica que é uma característica natural do agregado laterítico possuir uma alta porosidade, e, conseqüentemente, uma alta absorção. As características obtidas são compatíveis com a caracterização deste material também em pesquisas como as de Amaral (2004) e Chagas (2011).

4.1.3 Índice de Forma

Na Tabela 16 estão apresentados os resultados obtidos após realização do ensaio de índice de forma. Nele foi possível verificar que os agregados graúdos utilizados na pesquisa atendem aos critérios de forma exigidos pelos órgãos rodoviários brasileiros.

Tabela 16 - Resultados obtidos para os ensaios de índice de forma.

Agregado	Índice de Forma	Critério (DNER – ME 086/94)	Mín. Aceitável
Brita Granítica 19.0 mm	0,91	$0 \leq f \leq 1$ sendo: $f=1 \rightarrow$ ótima esfericidade $f=0 \rightarrow$ lamelar	0,5
Brita Granítica 9.5 mm	0,65		
Brita Laterítica 19.0 mm	0,93		
Brita Laterítica 9.5 mm	0,78		

4.1.4 Equivalente Areia

Os resultados obtidos para o ensaio estão expostos na Tabela 17. O valor mínimo admissível de equivalente areia para agregados a serem aplicados na pavimentação é de 55%. A areia e o pó de pedra utilizados na pesquisa atenderam de forma satisfatória a esse critério enquanto que o pó de laterita não atende, esse material apresenta uma porcentagem de finos superior a do pó de pedra, o que exerce influência direta nos resultados do equivalente de areia do material.

Tabela 17 - Resultados obtidos para os ensaios de equivalente areia.

Agregado	Equivalente Areia (%)	Mínimo Aceitável (%)
Areia	87	55
Pó de Pedra	61	55
Pó de Laterita	23	55

4.1.5 Partículas Alongadas e Achatadas (*F&E*)

Na Tabela 18 estão apresentados os resultados obtidos a partir do ensaio (*F&E*). Partículas alongadas e achatadas (*F&E*) são expressas pela porcentagem em massa de agregado graúdo, que tem a razão entre a dimensão máxima e a dimensão mínima maior do

que 5, sendo indesejáveis porque têm a tendência de quebrarem durante o processo de construção e sob a ação do tráfego. Desse modo, os órgãos rodoviários estabelecem um máximo de 10% de partículas alongadas e achatadas em agregados graúdos a serem utilizados em misturas asfálticas. Os agregados utilizados na pesquisa apresentaram resultados satisfatórios quanto ao critério de lamelaridade, atendendo ao limite estabelecido por norma.

Tabela 18 - Resultados dos ensaios de partículas alongadas e achatadas (*F&E*).

Agregado	<i>F&E</i>	Critério	Requisito Mínimo
Brita Granítica 19.0 mm	2,56%	5:1	< 10%
Brita Granítica 9.5 mm	0,0%		
Brita Laterítica 19.0 mm	0,0%		
Brita Laterítica 9.5 mm	0,0%		

4.1.6 Partículas Fraturadas

Na Tabela 19 estão dispostos os resultados obtidos para o ensaio de partículas fraturadas. A análise das amostras dos agregados utilizados na pesquisa indica que todos atendem aos requisitos estabelecidos para o quantitativo de partículas fraturadas.

Tabela 19 - Resultados dos ensaios de partículas fraturadas.

Agregado	Resultado	Critério	Requisito Mínimo
Brita Granítica 19.0 mm	100%	Uma ou mais Faces Fraturadas	> 90%
Brita Granítica 9.5 mm	100%		
Brita Laterítica 19.0 mm	100%		
Brita Laterítica 9.5 mm	100%		

As faces fraturadas indicam a angularidade do agregado graúdo e garantem o atrito entre as partículas que propiciam a resistência à deformação permanente das misturas. Dessa forma, os agregados utilizados nesta pesquisa podem ser aplicados em misturas asfálticas.

4.1.7 Angularidade

Na Tabela 16 estão apresentados os resultados de angularidade obtidos para os agregados utilizados na pesquisa.

O ensaio de angularidade realizado possibilitou verificar os requisitos de angularidade dos agregados miúdos. Avaliando os agregados miúdos utilizados na pesquisa, foi possível verificar que todos atenderam aos requisitos normativos, ou seja, apresentam valores de angularidade superiores a 40% pelo menos.

Tabela 20 - Resultados obtidos para os ensaios de angularidade.

Agregado	Resultado	Critério	Requisito Mínimo	
			Volume de Tráfego Médio	Volume de Tráfego Alto
Areia	45,50%	Método B	> 40%	> 45%
Pó de Pedra	45,90%			
Pó de Laterita	47,10%			

4.1.8 AIMS

Os agregados foram separados por tamanho retido nas malhas das peneiras da série norte americana, de acordo com as quantidades recomendadas. O AIMS 2 forneceu resultados em forma de distribuições cumulativas e ainda um valor característico para cada propriedade, a partir de uma média, desvio padrão e coeficiente de variação para cada material investigado. Os parâmetros estatísticos investigados nesta pesquisa são referentes aos agregados graúdos estudados (TMN 19.0 mm e TMN 9.5 mm), considerando-se toda a sua distribuição granulométrica, ou seja, consideram-se os valores obtidos para as diversas frações de agregados.

4.1.8.1 Forma 2D

Nas Figuras 43 e 44 estão ilustrados os gráficos que apresentam os resultados do parâmetro forma 2D para as partículas de agregados graníticos e lateríticos respectivamente.

A partir de imagens bidimensionais das partículas, o parâmetro forma 2D quantificou a forma relativa da fração miúda dos agregados investigados. Para esse parâmetro, em uma escala que vai de 0 a 20, um círculo perfeito tem valor igual a 0.

Figura 43 – Resultado do parâmetro Forma 2D para o agregado granítico.

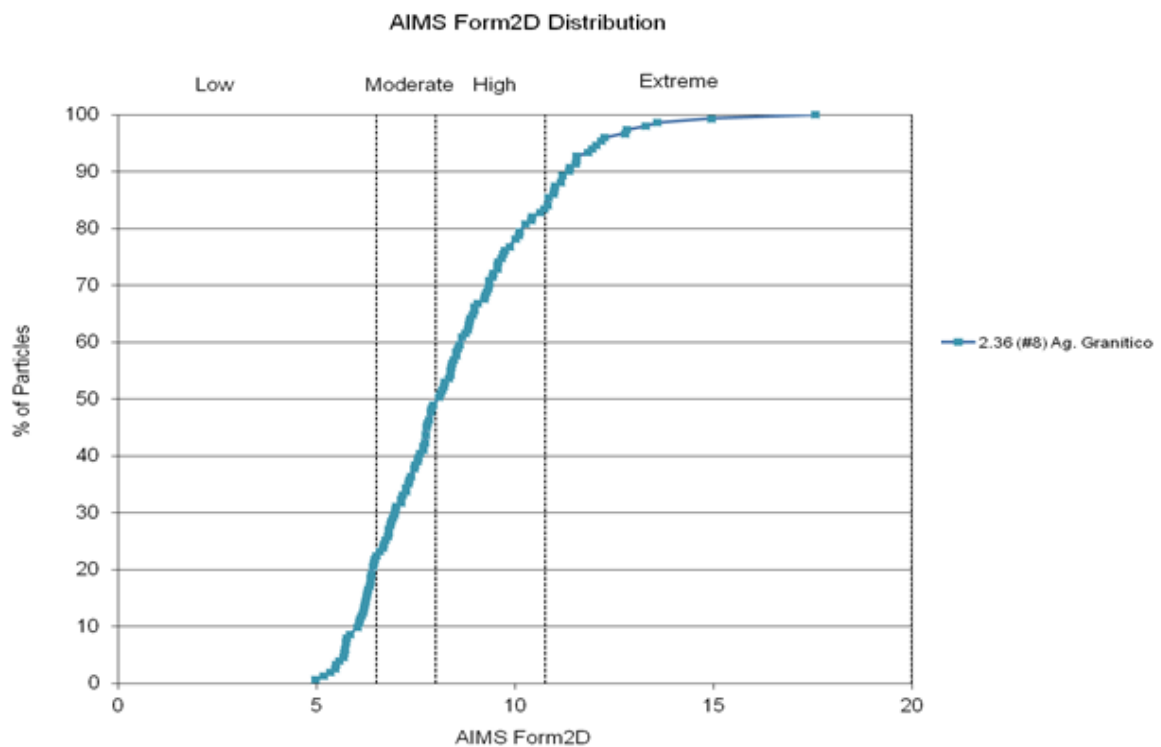
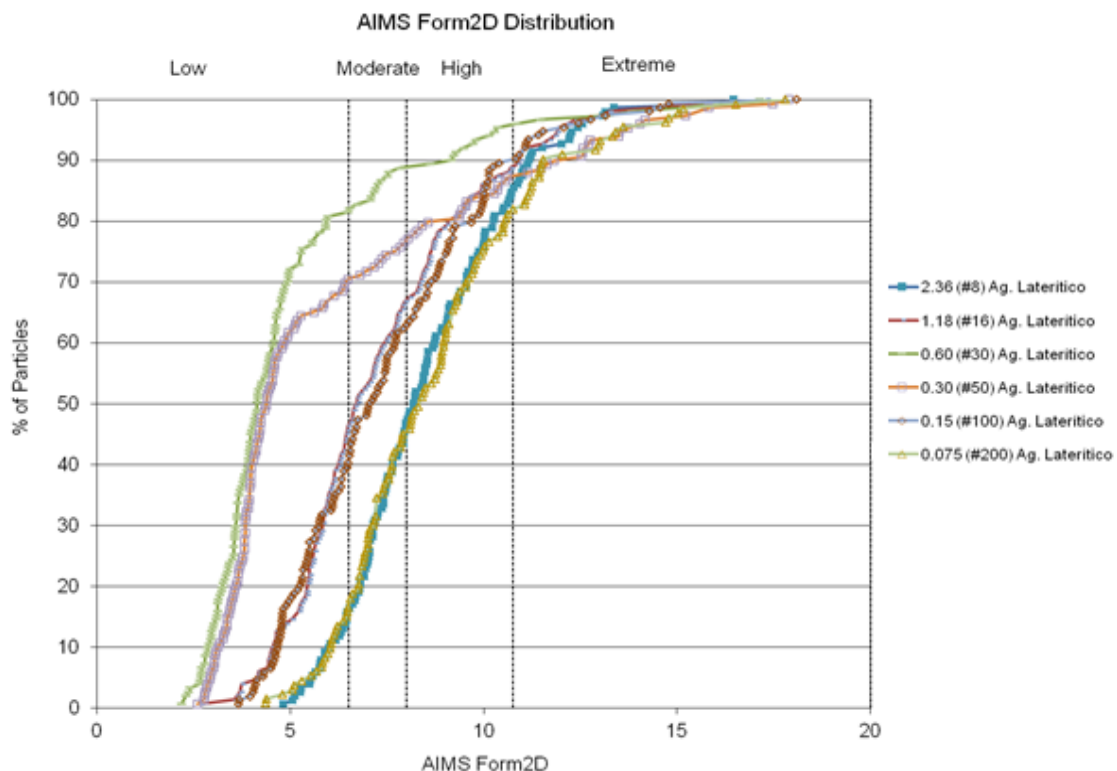


Figura 44 - Resultado do parâmetro Forma 2D para o agregado laterítico.



Observa-se que os agregados graníticos apresentam valor de forma 2D maiores que os valores obtidos pelos agregados lateríticos, o que indica que os agregados lateríticos apresentam partículas mais arredondadas. Tal fato pode ser justificado pela sensibilidade ao desgaste que esse material apresenta; esta característica faz com que as partículas sofram fraturas até mesmo pelo contato entre elas.

Para o agregado granítico o valor médio do parâmetro de forma 2D foi de 8,43 classificando-o assim como semialongado, enquanto que para o agregado laterítico esse valor foi de 7,18 o que permitiu classificá-lo como semicircular.

4.1.8.2 Angularidade

Nas Figuras 45 e 46 estão ilustrados os resultados da angularidade das partículas dos agregados graníticos e lateríticos respectivamente.

As análises do parâmetro angularidade foram realizadas tanto para as frações miúdas quanto para as frações graúdas dos agregados estudados. Esse critério mediu as variações geométricas nas bordas das partículas a partir de imagens bidimensionais.

A escala de angularidade do sistema *AIMS 2* abrange um intervalo de 0 a 10000, onde 0 corresponde a um círculo perfeito e que, portanto, tem um valor de angularidade muito baixo. Quanto maior a angularidade, maior é o atrito entre as partículas, propiciando maior resistência à deformação permanente, desta forma é importante que nesta análise os valores se distanciem do 0.

Figura 45 - Resultado do parâmetro angularidade para o agregado granítico.

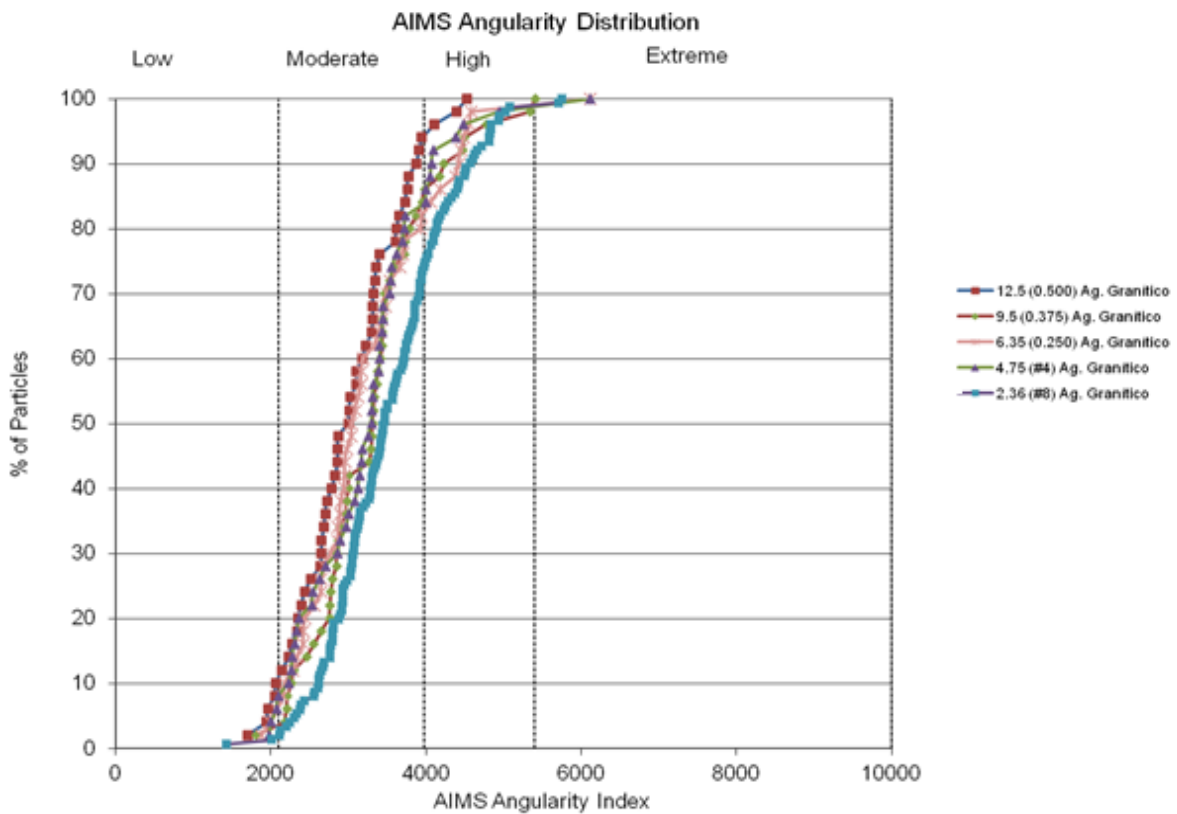
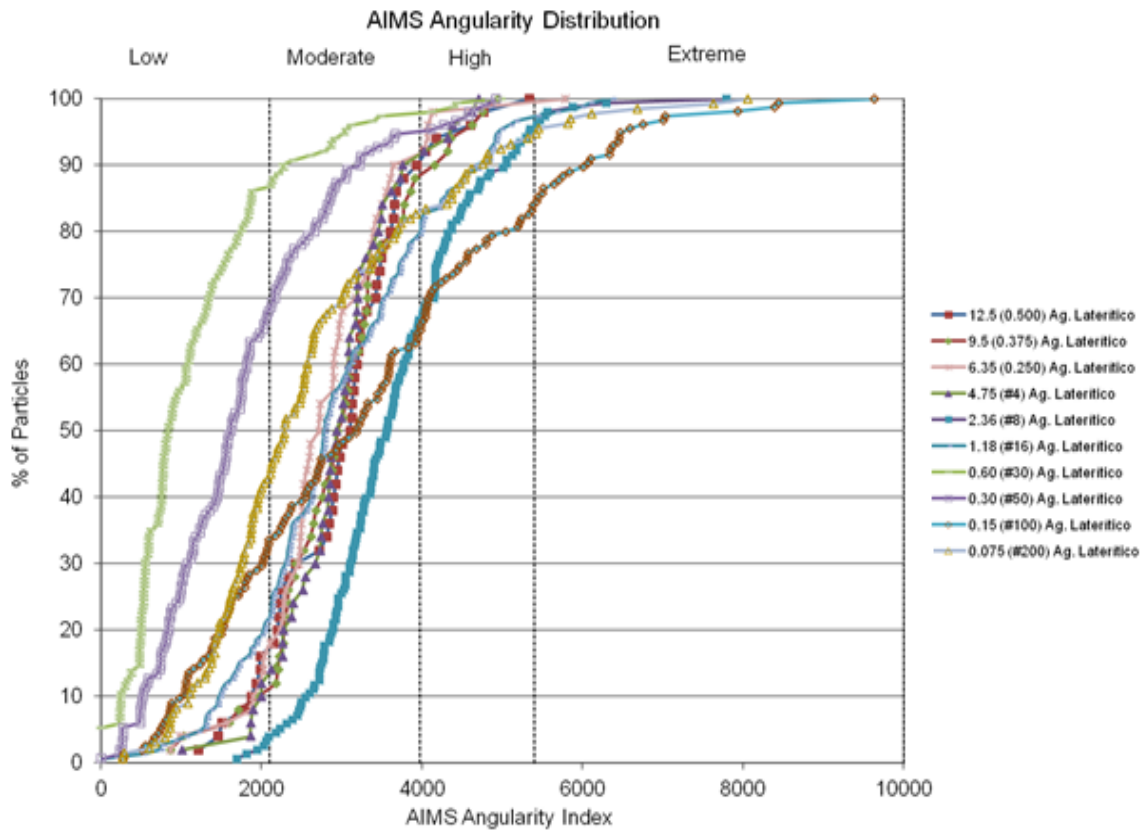


Figura 46 - Resultado do parâmetro angularidade para o agregado laterítico.



O agregado granítico apresentou valor de angularidade médio de 3289,3 enquanto que o laterítico apresentou um valor de 2728,6; ambos ficaram classificados como subarredondados segundo os critérios do equipamento. De acordo com este parâmetro, verifica-se que o agregado granítico é mais angular que o laterítico.

A classificação semelhante quanto a angularidade foi confirmada também no ensaio convencional, cujos valores obtidos ficaram próximos revelando que apenas a angularidade não distingue o agregado granítico do laterítico.

4.1.8.3 Textura Superficial

Nas Figuras 47 e 48 estão ilustrados os gráficos que apresentam os resultados da textura superficial para o agregado granítico e laterítico respectivamente.

A avaliação do parâmetro de textura superficial verifica a polidez ou rugosidade das partículas, aplicando-se apenas às frações graúdas. No sistema *AIMS2* a escala desse parâmetro varia de 0 a 1000, sendo um agregado polido aquele cujo valor de textura é bem próximo de zero. O uso de agregados com textura superficial mais rugosa tende a proporcionar a obtenção de misturas asfálticas mais estáveis e resistentes ao acúmulo de deformações permanentes.

Figura 47 - Resultado do parâmetro textura superficial para o agregado granítico.

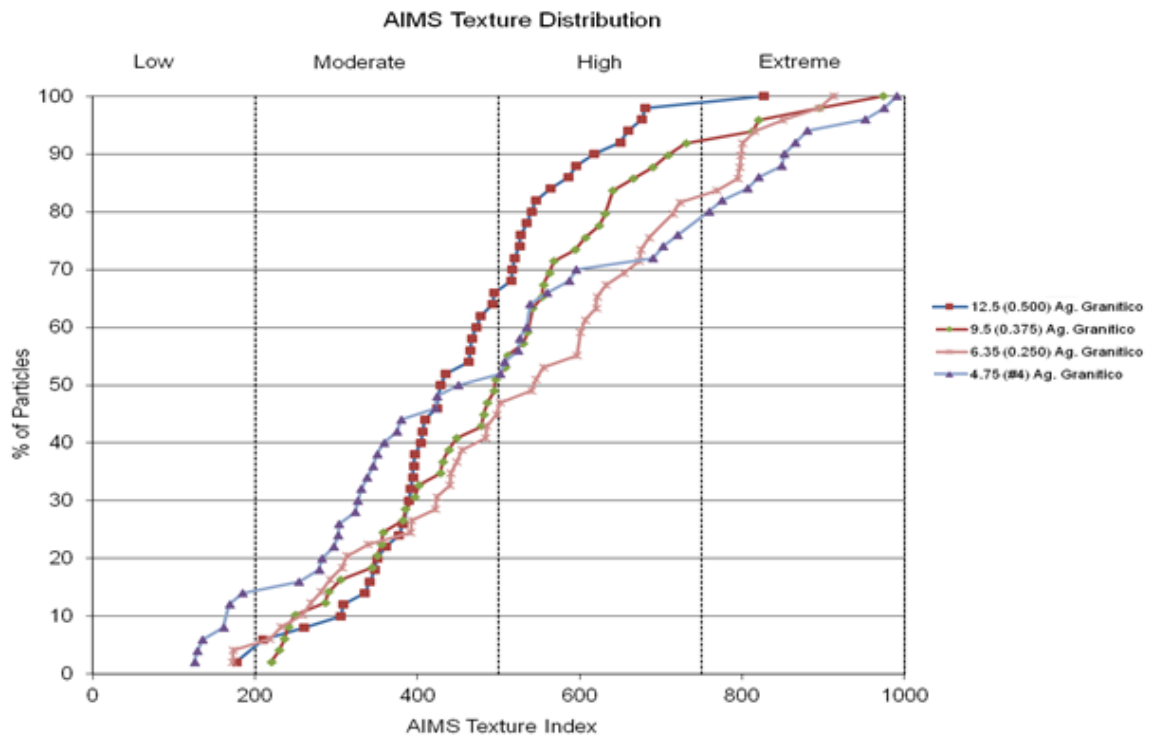
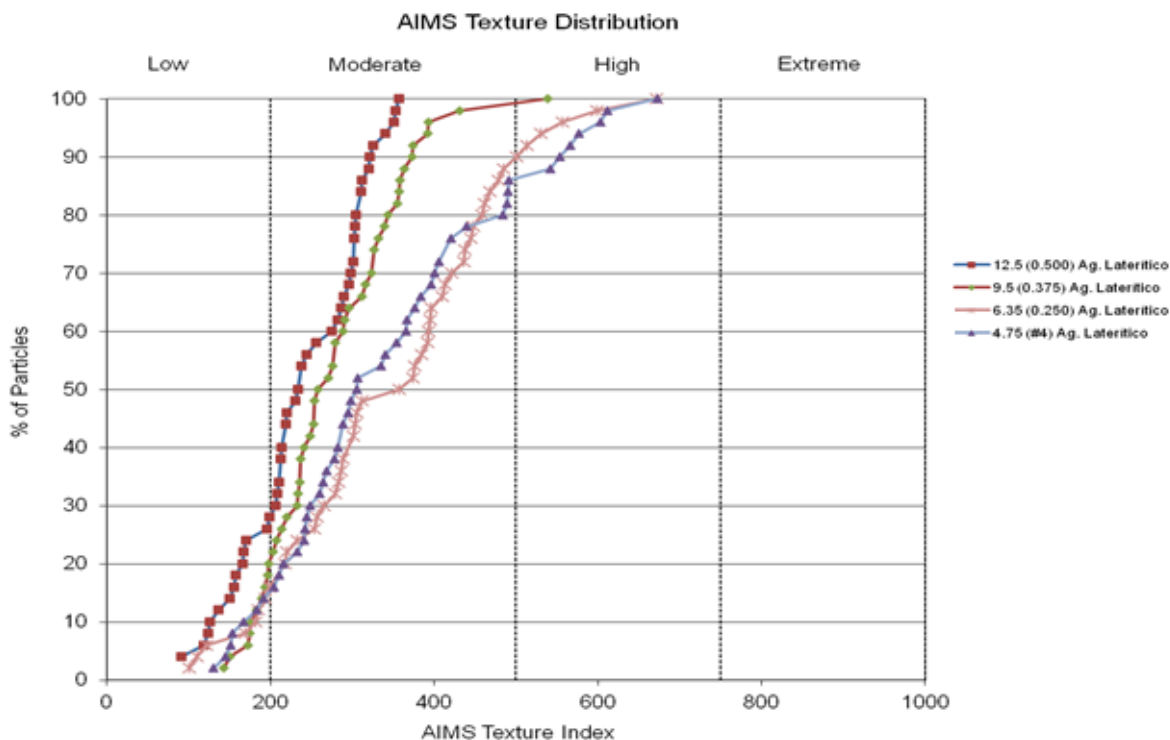


Figura 48 - Resultado do parâmetro textura superficial para o agregado laterítico.



O valor médio deste parâmetro para o agregado granítico foi de 512,55 classificando-o assim como de alta rugosidade. Para o agregado laterítico o valor médio foi de 317,15 classificando-o como de baixa rugosidade.

Tais resultados podem representar influência nos resultados do ensaio de cântabro uma vez que esse verifica a resistência à desagregação da mistura, ou seja, o quanto uma mistura resiste ao tráfego sem que desagregue as partículas. Deste modo, os resultados que indicam a rugosidade podem ser associados a maior ou menor desagregação, tendo em vista que materiais menos rugosos são mais propensos a apresentar menor aderência entre as partículas.

O tipo de rocha em análise influencia significativamente os resultados de textura superficial, por este motivo a diferença entre os valores obtidos para os agregados da pesquisa é aceitável, uma vez que se trata de agregados de origem completamente distintas. A origem do agregado laterítico a partir de processos de intemperismo justifica também a sua textura menos rugosa, uma vez que há o desgaste das faces dos grãos, deixando-os mais polidos.

4.1.8.4 Coarse Aggregate Angularity Texture Value – CAAT

Nas Figuras 49 e 50 estão ilustrados os gráficos construídos a partir dos resultados CAAT para o agregado granítico e laterítico respectivamente.

O valor de angularidade-textura (*coarse aggregate angularity texture value – CAAT*) é medido para as frações graúdas e é uma combinação dos valores de angularidade e textura dos agregados em análise. No sistema *AIMS2* a escala desse parâmetro varia de 0 a 15000.

Figura 49 - Resultado do parâmetro CAAT para o agregado granítico.

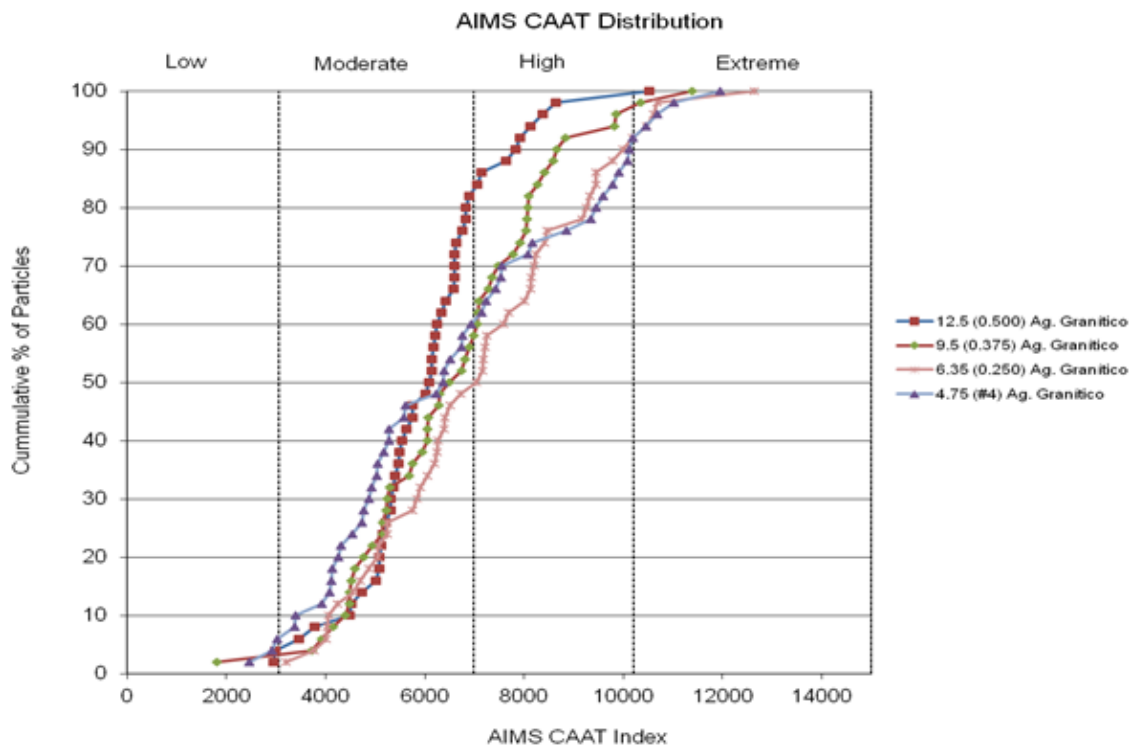
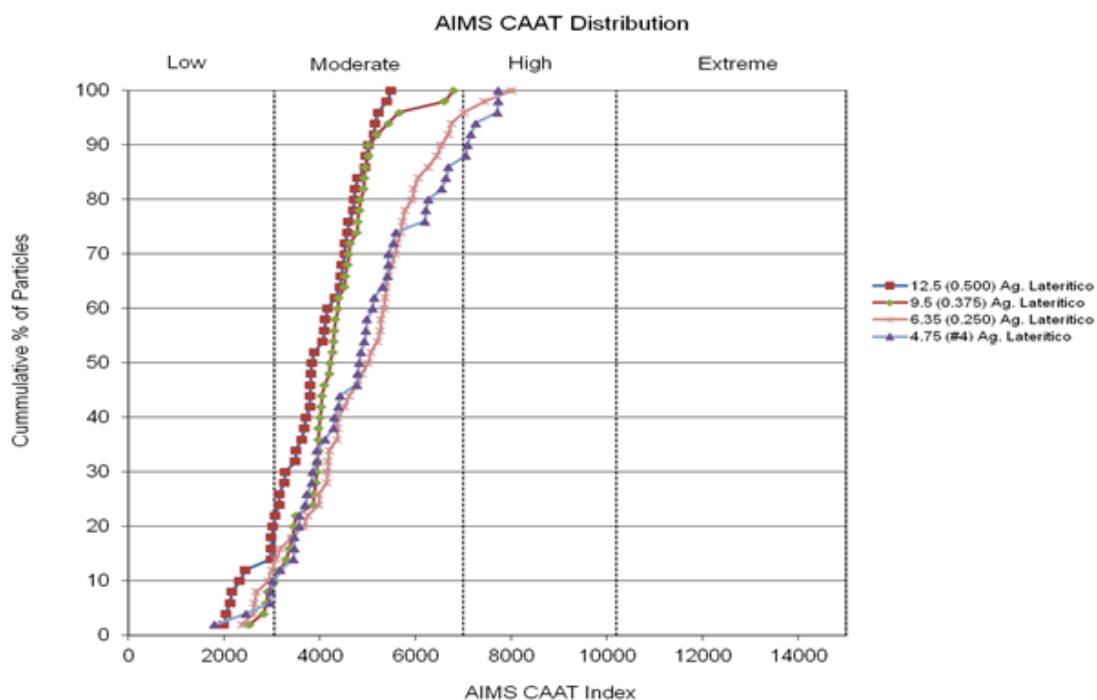


Figura 50 - Resultado do parâmetro CAAT para o agregado laterítico



A análise do agregado granítico forneceu valor médio de 6768,9 para o CAAT deste agregado, enquanto que para o agregado laterítico o valor médio foi de 4618,6. Tais resultados já eram esperados, uma vez que o parâmetro CAAT é calculado com base na textura e angularidade dos agregados e os valores do agregado granítico foram superiores aos dos agregados lateríticos.

4.1.8.5 Partículas Alongadas e Achatadas (F&E)

Nas Figuras 51 e 52 estão ilustradas as distribuições das partículas alongadas e achatadas considerando as proporções analisadas pelo sistema *AIMS2*.

A proporção de partículas F&E foi determinada a partir das relações entre a maior e a menor dimensão dos agregados em análise. Esse parâmetro foi verificado para as frações graúdas dos agregados em estudo.

Figura 51 - Resultado da distribuição F&E das partículas do agregado granítico.

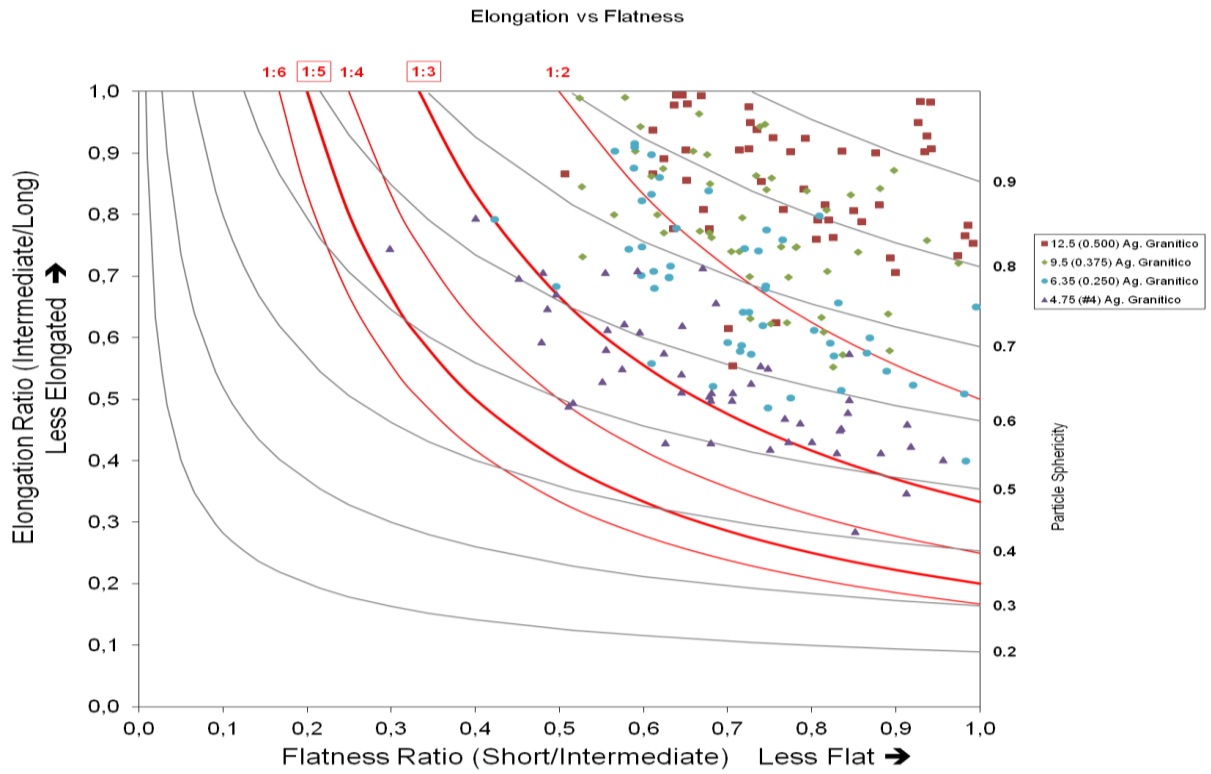
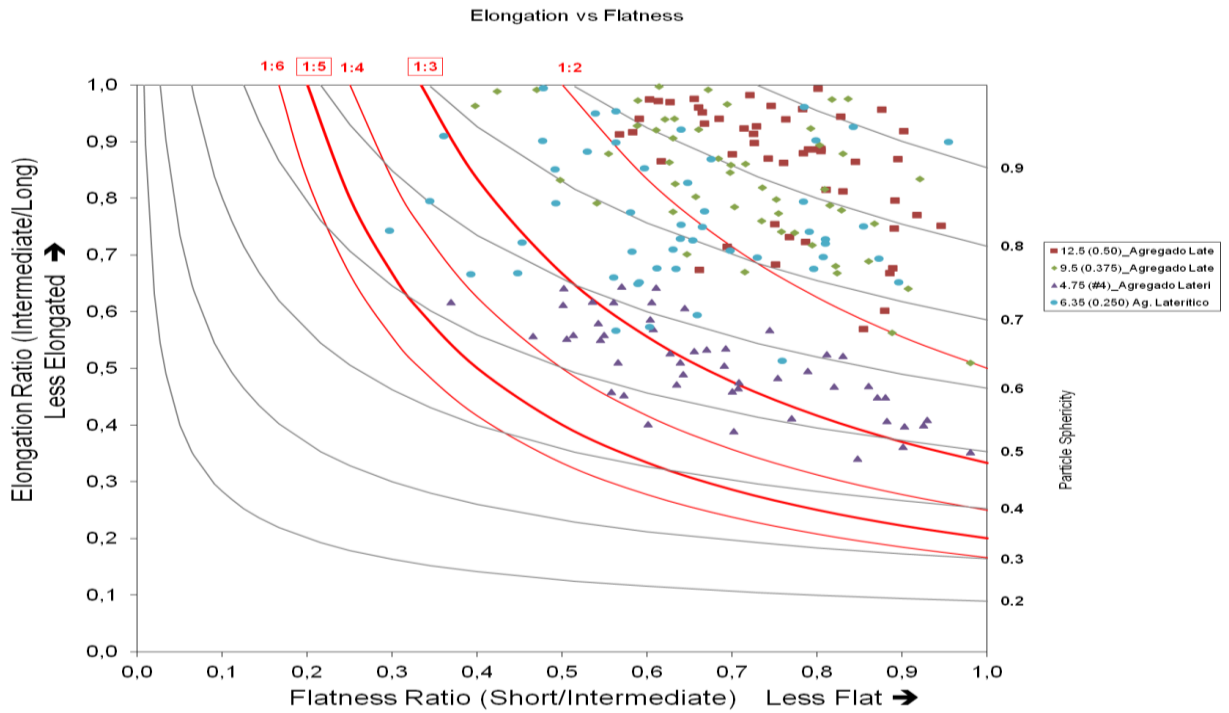


Figura 52 - Resultado da distribuição F&E das partículas do agregado laterítico.



Na Tabela 21 estão descritas as proporções de partículas F&E dos agregados ensaiados, considerando as relações de 2:1, 3:1 e 5:1 entre a maior e a menor dimensão das partículas.

Tabela 21 - Resultados do parâmetro F&E para os agregados analisados.

Parâmetro	Agregado Granítico	Agregado Laterítico
F&E 2:1	49,2%	45,5%
F&E 3:1	12,1%	15,5%
F&E 5:1	0,0%	0,0%

Conforme verificado no ensaio realizado segundo a norma ASTM D 4791/10 cujo os resultados estão na Tabela 18, a proporção 5:1 evidencia as características de pouca lamelaridade das partículas ensaiadas, o que favorece a aplicação dessas em misturas asfálticas. Para as demais proporções ensaiadas, ambos os agregados apresentaram comportamento parecido. Observando os critérios de aceitação, tem-se que os agregados da pesquisa podem ser aplicados em misturas asfálticas de forma a apresentar intertravamento adequado e resistência significativa à deformação permanente.

4.1.8.6 Esfericidade

Nas Figuras 53 e 54 estão ilustrados os gráficos com os resultados das análises do parâmetro esfericidade para os agregados graníticos e lateríticos, respectivamente.

A avaliação do parâmetro esfericidade foi realizada nas frações graúdas dos agregados ensaiados. Esse parâmetro descreve a forma tridimensional de uma partícula de agregado e tem uma escala relativa de 0 a 1,0. Quanto mais próximo de 1,0 for o valor da esfericidade, mais próximo do formato de uma partícula de agregado totalmente cúbica, ou com suas três dimensões de mesmo tamanho será o agregado. O fato de que agregados mais alongados e achatados não são favoráveis às misturas asfálticas conduz à procura por agregados que tenham esfericidade mais próxima de um. No entanto, ao observar os valores de esfericidade, deve-se ter o cuidado de verificar se não há grandes excesso de partículas com esta característica acentuada, pois este resultado pode indicar que o agregado é esférico, o que também não é favorável para misturas asfálticas.

Figura 53 - Resultados da avaliação do parâmetro esfericidade para o agregado granítico.

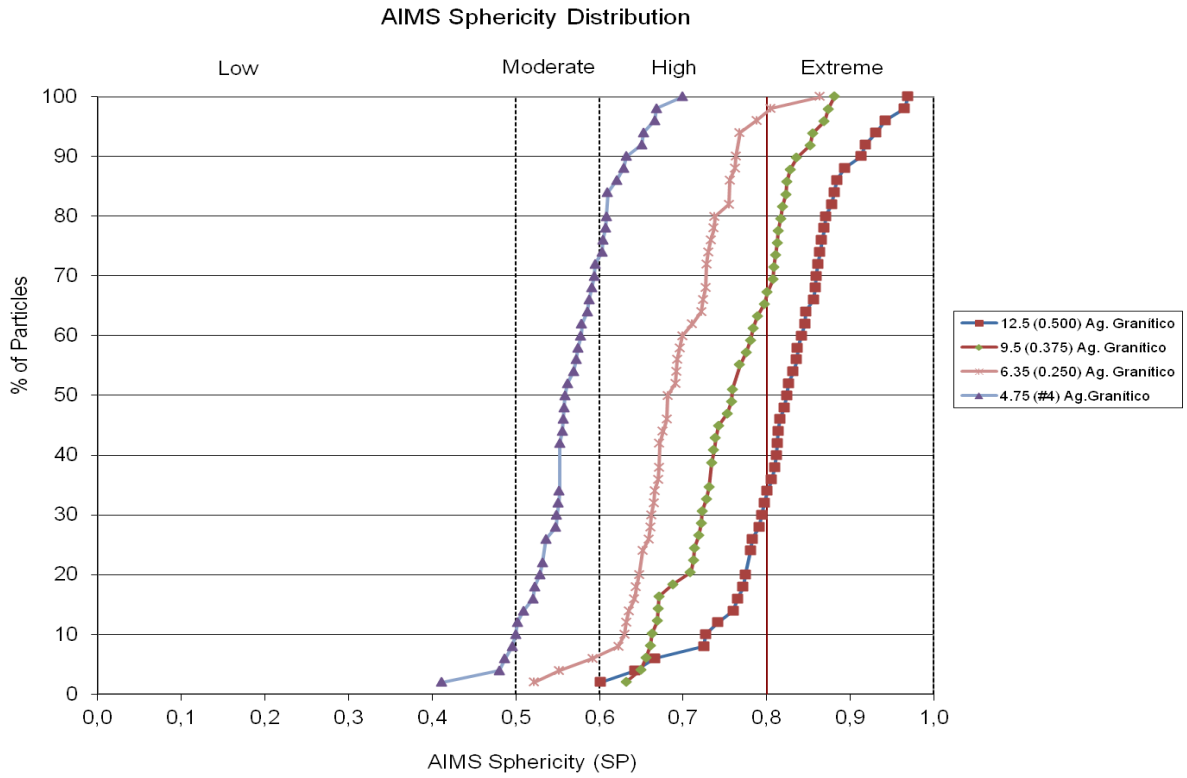
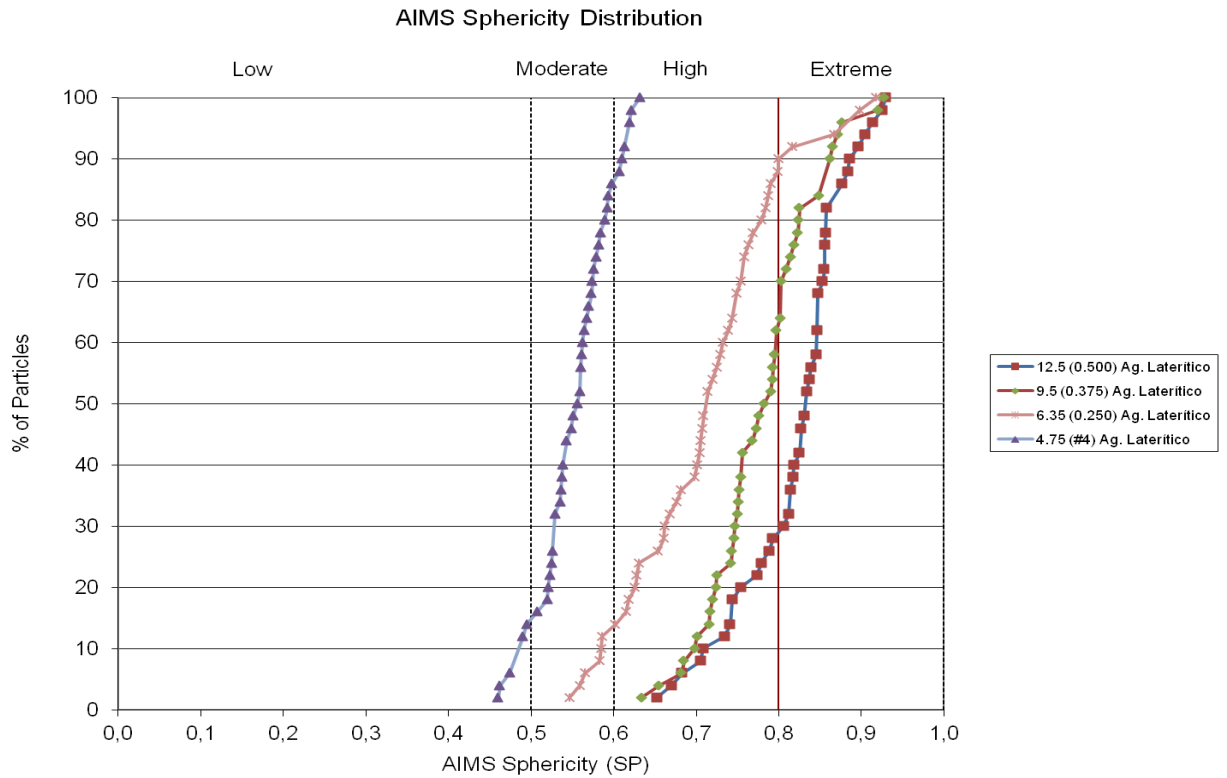


Figura 54 - Resultados da avaliação do parâmetro esfericidade para o agregado laterítico.



Para a avaliação do parâmetro esfericidade, o agregado granítico apresentou valor médio de 0,706 enquanto o agregado laterítico apresentou valor médio de 0,715; ficando desta forma ambos classificados como de esfericidade moderada. Ao observar os gráficos com os resultados da avaliação, percebe-se que os dois tipos de agregados ensaiados têm comportamento semelhante quanto à esfericidade. A partir desse resultado, implica-se que ambos têm esfericidade adequada para utilização em misturas asfálticas para pavimentação.

4.1.8.7 Resumo dos Resultados

Na Tabela 22 estão resumidos os valores médios e a classificação dos agregados avaliados para os parâmetros observados. Observa-se que, embora o agregado laterítico seja menos usual que o granítico em misturas asfálticas, as características avaliadas pelo sistema *AIMS 2* são semelhantes.

Entretanto, destaca-se que o agregado laterítico apresenta classificação menos favorável que o granítico para o uso em misturas asfálticas devido aos resultados de forma 2D e textura superficial. Todavia não descarta-se a aplicação e utilização do agregado laterítico, uma vez que em muitas regiões esta é a única opção economicamente viável e suas características não o classificam como impróprio uma vez que na maioria das avaliações atende aos critérios.

Tabela 22 - Resumo dos resultados dos parâmetros observados.

Forma 2D		Classificação
Granítico	8,43	Semialongado
Laterítico	7,18	Semicircular
Angularidade		Classificação
Granítico	3289,3	Subarredondado
Laterítico	2728,6	Subarredondado
Textura Superficial		Classificação
Granítico	512,55	Alta Rugosidade
Laterítico	317,15	Baixa Rugosidade
Esfericidade		Classificação
Granítico	0,706	Esfericidade Moderada
Laterítico	0,715	Esfericidade Moderada

4.1.9 Durabilidade

Com o intuito de verificar a resistência ao ataque de sulfatos dos agregados empregados na pesquisa, foram realizados ensaios de durabilidade nas frações graúdas. Na Tabela 20 estão descritos os resultados obtidos, bem como o limite estabelecido por norma.

Tabela 23 - Resultados obtidos para os ensaios de durabilidade.

Agregado	Resultado		Critério (DNIT ME 089/94)
Brita Granítica 19.0 mm	1,84%	Satisfatório	Perda de Massa < 12%
Brita Granítica 9.5 mm	4,16%	Satisfatório	
Brita Laterítica 19.0 mm	57,99%	Insatisfatório	
Brita Laterítica 9.5 mm	64,28%	Insatisfatório	

Os agregados graníticos apresentaram resultados que atendem às exigências dos órgãos reguladores, enquanto os agregados lateríticos apresentam baixa resistência ao ataque por sulfatos, e os resultados obtidos estão cerca de 5 vezes acima do permitido, ou seja, esse material é cerca de 500% menos resistente ao ataque por sulfatos do que deveria ser para atender às exigências normativas.

Moizinho (2007) explica que as concreções lateríticas em geral são compostas basicamente por óxidos de ferro e alumínio, o que justifica o desgaste elevado quando esse material é submetido à solução de sulfato de sódio. De acordo com Coutinho (2001) as reações entre sulfatos e óxidos são favorecidas pelo meio e continuam ocorrendo enquanto houver condições para tal. Dessa forma as reações do ensaio de durabilidade em agregados lateríticos são favorecidas pelos ciclos de secagem e imersão, também por isso ocorre elevado ataque dos sulfatos nesse material.

4.1.10 Adesividade

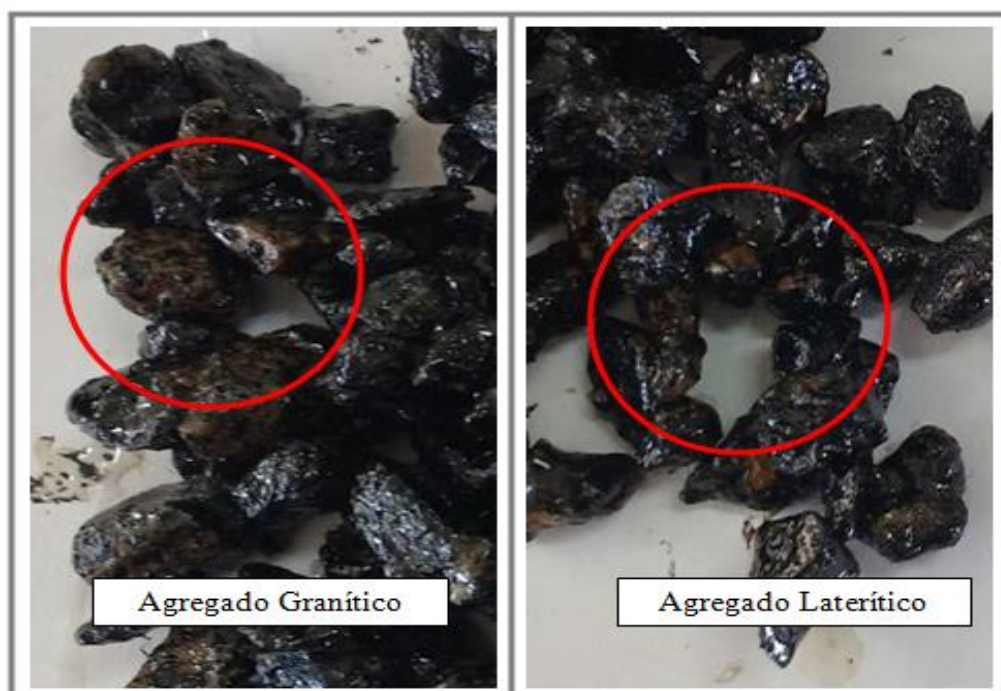
O efeito da água em separar ou descolar a película de ligante asfáltico da superfície do agregado pode torná-lo inaceitável para uso em misturas asfálticas. Foi realizado ensaio de adesividade com os agregados utilizados na pesquisa para avaliação desta característica. Na Tabela 24 estão apresentados os resultados obtidos.

Tabela 24 - Resultados dos ensaios de adesividade.

Agregado	Resultado	DNIT ME 078/94
Brita Granítica 19.0 mm	Insatisfatório	
Brita Laterítica 19.0 mm	Insatisfatório	

Ambos os agregados ensaiados apresentaram resultado insatisfatório para o ensaio, nos dois houve descolamento da película de ligante asfáltico, conforme ilustra a Figura 55. A ocorrência do descolamento pode ser explicada não apenas pelas características dos agregados, mas também pela qualidade do ligante utilizado, podendo ser corrigida com o uso de aditivos melhoradores (*dope*).

Figura 55 - Agregados após ensaio de adesividade.



4.1.11 Abrasão Los Angeles

Na Tabela 25 estão apresentados os resultados obtidos para os ensaios de abrasão Los Angeles realizados com os agregados utilizados na pesquisa. A norma do DNIT ME 035/98 estabelece como aceitável uma abrasão de até 50% e, assim, observa-se que todos apresentaram resultado satisfatório.

Tabela 25 - Resultados obtidos para os ensaios de abrasão Los Angeles.

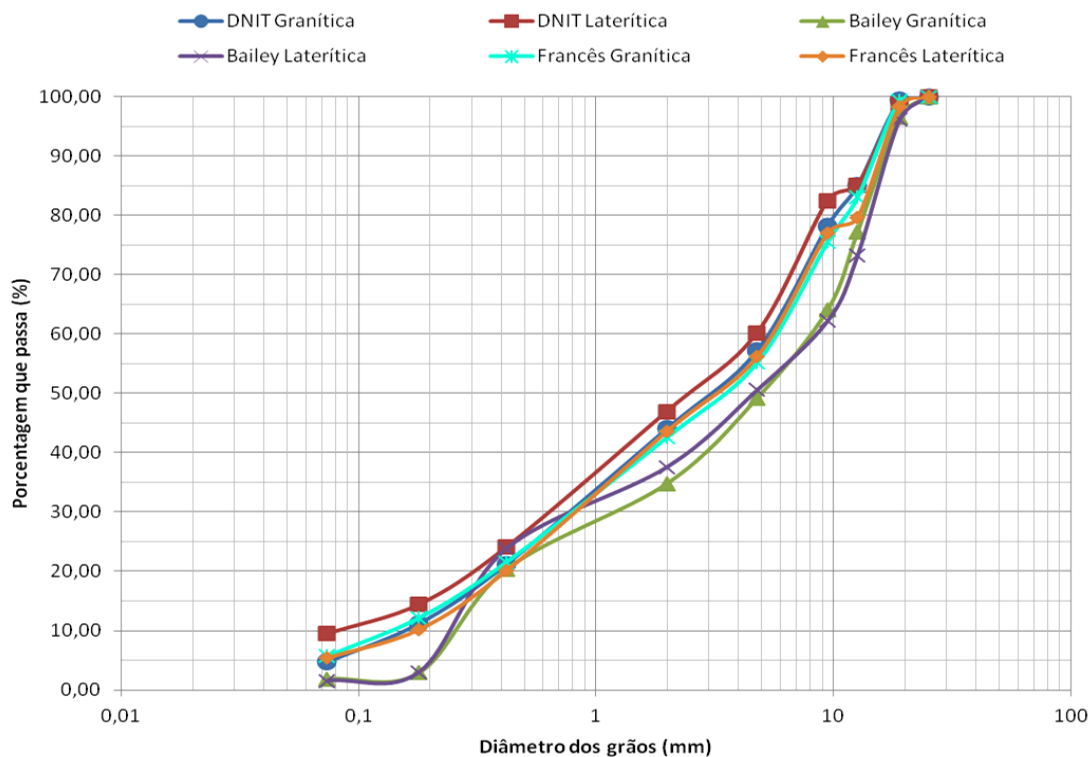
Agregado	Resultado		Critério (DNIT ME 035/98)
Brita Granítica 19.0 mm	20,6%	Satisfatório	LA < 50%
Brita Granítica 9.5 mm	25,7%	Satisfatório	
Brita Laterítica 19.0 mm	39,1%	Satisfatório	
Brita Laterítica 9.5 mm	31,2%	Satisfatório	

4.2 Análise da FAD

Para identificar a FAD, primeiro foi necessário traçar as curvas granulométricas das misturas selecionadas (Figura 56). No total foram analisadas seis curvas granulométricas, duas determinadas pelo método do DNIT, duas determinadas pelo método Bailey e mais duas determinadas pelo método Francês.

Destaca-se que todas as curvas apresentam traçado semelhante, fato que pode favorecer a análise dos resultados uma vez que será possível confirmar que os fatores que distinguem as misturas são apenas o método de seleção granulométrica e o tipo de agregado utilizado.

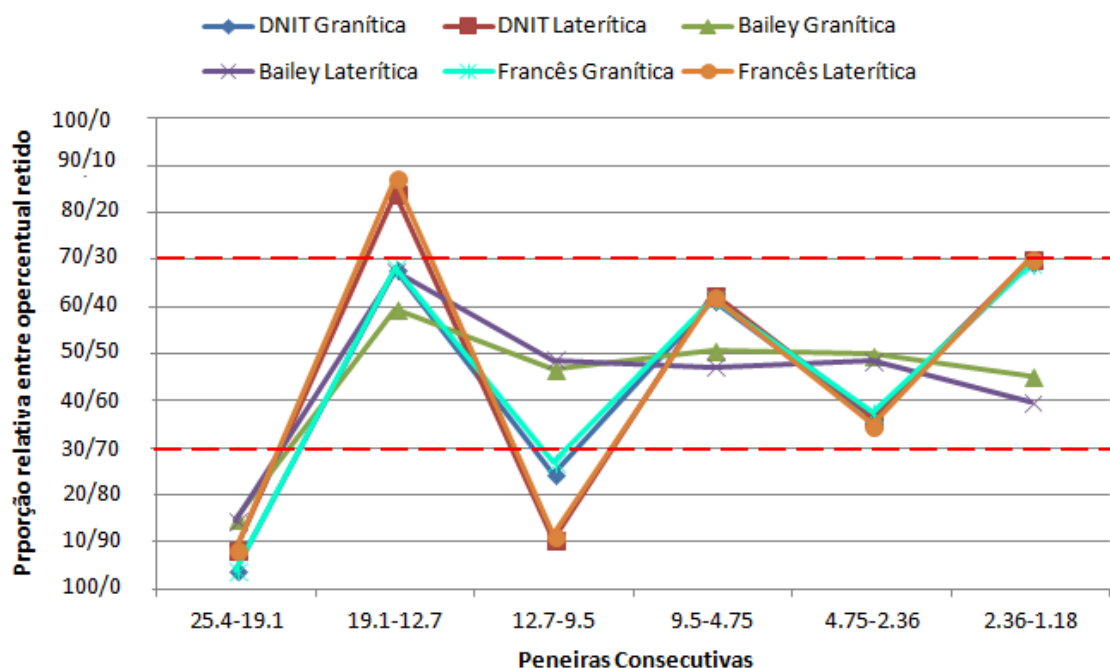
Figura 56 - Curvas granulométricas das misturas estudadas na pesquisa.



Em seguida, para avaliação da granulometria pela metodologia FAD, foram determinadas as proporções relativas do percentual retido entre peneiras consecutivas, e foram construídos os diagramas de interação para todas as misturas desta pesquisa.

Na Figura 57 está ilustrado o diagrama de interação FAD a partir do qual foi possível identificar quais peneiras estavam interagindo.

Figura 57 - Diagrama de interação FAD.



A análise desses diagramas permitiu identificar visualmente quais peneiras compõem a FAD das misturas analisadas. A FAD de cada mistura é a peneira ou grupo de peneiras que interagem entre si (possuem proporções relativas de material retido entre as proporções 70/30 e 30/70) e apresentam a menor porosidade. Por isso, foi necessário também que fosse realizada a avaliação dos valores de porosidade das misturas.

Na Tabela 26 estão descritos as FAD e os valores de porosidade obtidos para cada mistura.

Tabela 26 - FAD e porosidades das misturas da pesquisa.

Mistura	FAD	Porosidade
Granítico DNIT	19,0 - 1,18	50,30%
Laterítico DNIT	9,50 – 4,75	63,24%
Granítico Bailey	9,50 - 1,18	32,06%
Laterítico Bailey	12,7 - 1,18	30,61%
Granítico Francês	4,75 - 1,18	29,72%
Laterítico Francês	9,50 - 2,36	69,06%

Kim (2006) identificou que o espaçamento médio dos agregados retidos entre quaisquer duas peneiras consecutivas aumenta rapidamente quando a proporção relativa entre elas (% retido na peneira N / % retido na peneira imediatamente inferior a N) é inferior a 0,43 ou superior a 2,33. Isso sugere que dentro desse intervalo os agregados mantêm um espaçamento relativamente constante e garantem um contato efetivo necessário para formar o esqueleto pétreo que será responsável por resistir à deformação permanente.

O diagrama de interação da Figura 57 permite uma visão global de todas as peneiras que estão interagindo para a formação da FAD de cada mistura da pesquisa. No entanto, nem todas as peneiras, que interagem entre si e atendem ao critério 70/30 ou 30/70, compõe a FAD da mistura. Deve-se ater aos valores da porosidade.

Avaliando os valores de porosidade das misturas, foi possível determinar a FAD. Para Kim (2006) uma porosidade FAD inferior a 48% indica composições granulométricas com grande potencial de resistência à deformação permanente. Porosidades FAD entre 48 e 52% são chamadas de porosidades marginais e indicam composições com contato granular questionável, não sendo possível estimar a resistência à deformação permanente. Enquanto que para as misturas com porosidade FAD superior a 52% espera-se baixa resistência à deformação permanente.

Kim (2006) explica ainda que deve ser considerado também o fato de que misturas com valores de interação muito próximos aos limites também tendem a apresentar menor resistência à deformação permanente.

Desse modo, espera-se que as misturas laterítico DNIT e laterítico Francês apresentem menor resistência que as demais; por outro lado, as misturas granítico Bailey, laterítico Bailey e granítico Francês devem apresentar melhores resultados quanto às deformações permanentes, uma vez que suas porosidades atendem aos critérios estabelecidos. A cerca da mistura granítica DNIT não há como fazer previsões de resistência considerando a FAD, uma vez que seu valor de porosidade encontra-se na faixa de porosidade marginal.

4.3 Dosagem e Compactação das Misturas

De posse dos dados da seleção granulométrica das misturas foi possível realizar a dosagem das misturas para em seguida proceder com as compactações. Os dados da dosagem estão apresentados em anexo no final do trabalho.

As misturas selecionadas foram compactadas com o número de giros de projeto ($N_{projeto}$) igual a 100 a fim de obter misturas com V_v igual a 4%, conforme prescreve a metodologia da norma AASHTO MP 8-02/01. De posse dos parâmetros volumétricos de cada mistura testada, foi possível traçar os gráficos $V_v \times$ Teor de Ligante, a partir dos quais pode-se obter o teor ótimo de ligante para cada mistura.

Após análise dos gráficos e parâmetros volumétricos da mistura, foi possível determinar o teor ótimo de ligante para cada composição granulométrica selecionada, dessa forma foi feita a correção dos quantitativos de materiais e definidas as misturas de projeto, conforme apresentado na Tabela 27.

Tabela 27 - Quantitativos de material das misturas de projeto.

MISTURA DE PROJETO							
Mistura	Componente	Brita 19.00 mm	Brita 9.50 mm	Pó de Pedra	Areia	Cal (Fíler)	CAP
Granítico DNIT	%	21,0	24,8	33,3	14,3	1,9	4,7
Laterítico DNIT	%	20,3	30,5	20,3	13,8	7,4	7,7
Granítico Bailey	%	31,4	35,9	15,1	11,6	1,7	4,2
Laterítico Bailey	%	33,7	26,6	17,8	13,2	2,2	6,5
Granítico Francês	%	23,7	23,7	33,2	11,4	2,8	5,1
Laterítico Francês	%	28,1	28,1	18,7	15,0	3,7	6,3

Os teores ótimos de ligante ficaram definidos como; 4,73%, 4,23% e 5,05% para as misturas utilizando agregados graníticos, selecionadas pelo método DNIT, Bailey e Francês respectivamente; e de 7,67%, 6,50% e 6,30% para as misturas utilizando agregados lateríticos, selecionadas pelo método DNIT, Bailey e Francês. Das misturas de projeto, foram também definidos os parâmetros volumétricos conforme apresentado na Tabela 28.

Tabela 28 - Parâmetros das misturas de projeto.

PARÂMETROS DA MISTURA DE PROJETO DNIT					
Mistura	Parâmetro	V_v	VAM	RBV	P/A
Granítico DNIT	%	4,2	11,7	65,6	0,9
Laterítico DNIT	%	3,9	12,6	68,3	0,6
Granítico Bailey	%	4,0	12,6	68,1	0,9
Laterítico Bailey	%	4,4	11,1	63,7	0,6
Granítico Francês	%	4,0	11,5	65,3	0,8
Laterítico Francês	%	4,1	11,2	64,2	0,7

4.4 Propriedades das Misturas Asfálticas

Nos tópicos desta seção estão apresentados os resultados e análises dos ensaios de caracterização realizados com as misturas asfálticas estudadas. Além da avaliação quanto ao escoamento das misturas, foram avaliadas também as características mecânicas.

4.4.1 Sensibilidade ao Escoamento

Na Tabela 29 estão descritos os resultados obtidos para o ensaio de escoamento. As seis misturas de projeto foram submetidas à avaliação e todas atenderem ao critério estabelecido em norma quanto ao valor limite para misturas convencionais.

A avaliação deste parâmetro permitiu estabelecer a quantidade de material escoado (gotejado) das amostras das misturas asfálticas não compactadas quando essas foram mantidas a temperaturas elevadas, compatíveis com as que são utilizadas durante a produção, estocagem, transporte e espalhamento.

Tabela 29 - Resultados da avaliação da sensibilidade ao escorrimento.

Mistura	Resultado	Critério (ASTM D6390-11)
Granítica DNIT	0,03%	$\leq 0,3\%$
Laterítica DNIT	0,25%	
Granítica Bailey	0,26%	
Laterítica Bailey	0,21%	
Granítica Francês	0,05%	
Laterítica Francês	0,29%	

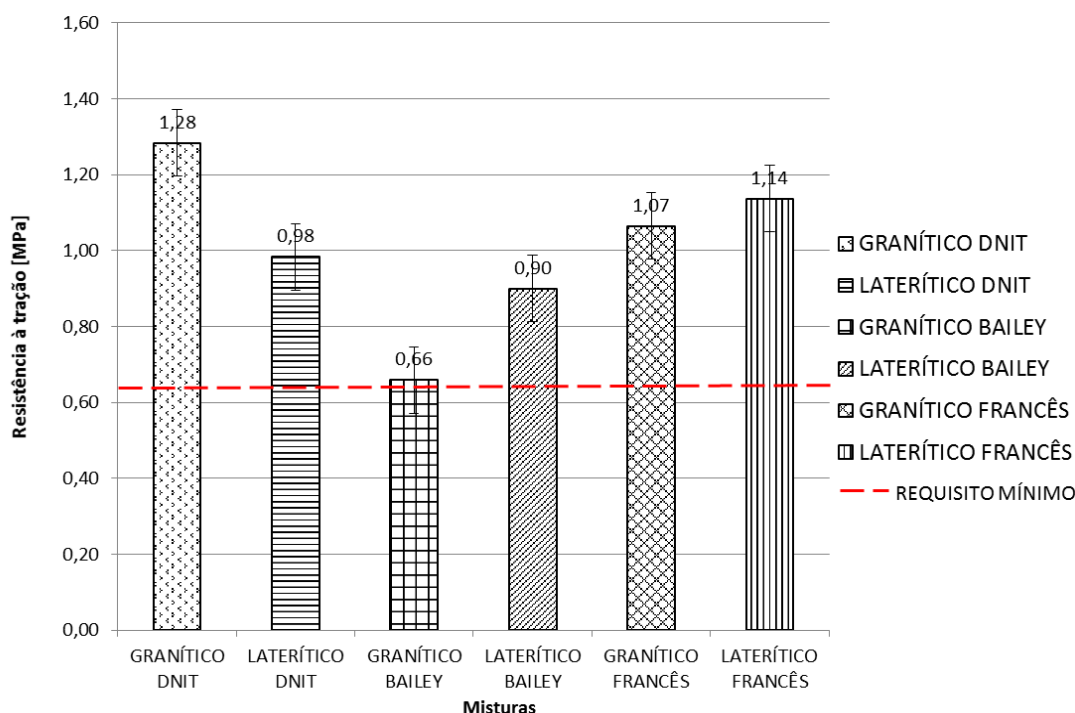
Tal procedimento foi realizado com o intuito de descartar a possibilidade de que as misturas necessitassem de aditivos ou estabilizantes para conter a exsudação uma vez que foram utilizados teores de ligante mais altos do que os convencionais. Os resultados confirmam que todas as misturas utilizadas na pesquisa atendem ao escorrimento para misturas convencionais, não necessitando da adição de aditivos estabilizadores.

Observa-se que as misturas utilizando agregados lateríticos, bem como ambas as misturas selecionadas pelo método Bailey, apresentam valores de porcentagem de escorrimento mais elevados, este fato pode ser explicado; para ambas as misturas pela maior absorção de ligante. Nas misturas lateríticas a maior absorção ocorre em todas as frações devido à natureza do agregado, enquanto que nas misturas do método Bailey ocorre devido a maior quantidade de fração graúda que absorve mais ligante. Assim essas misturas tendem a exsudar mais ligante quando aquecidas.

4.4.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Na Figura 58 estão ilustrados os resultados obtidos para cada uma das misturas ensaiadas. A norma DNIT 031/2006 ES especifica que o valor mínimo para a resistência a tração por compressão diametral deve ser de 0,65 MPa. Todas as misturas ensaiadas apresentam valor de RT superior ao estabelecido em norma, atendendo dessa forma às especificações desse parâmetro.

Figura 58 - Gráfico Resistência à Tração × Tipo de Mistura.



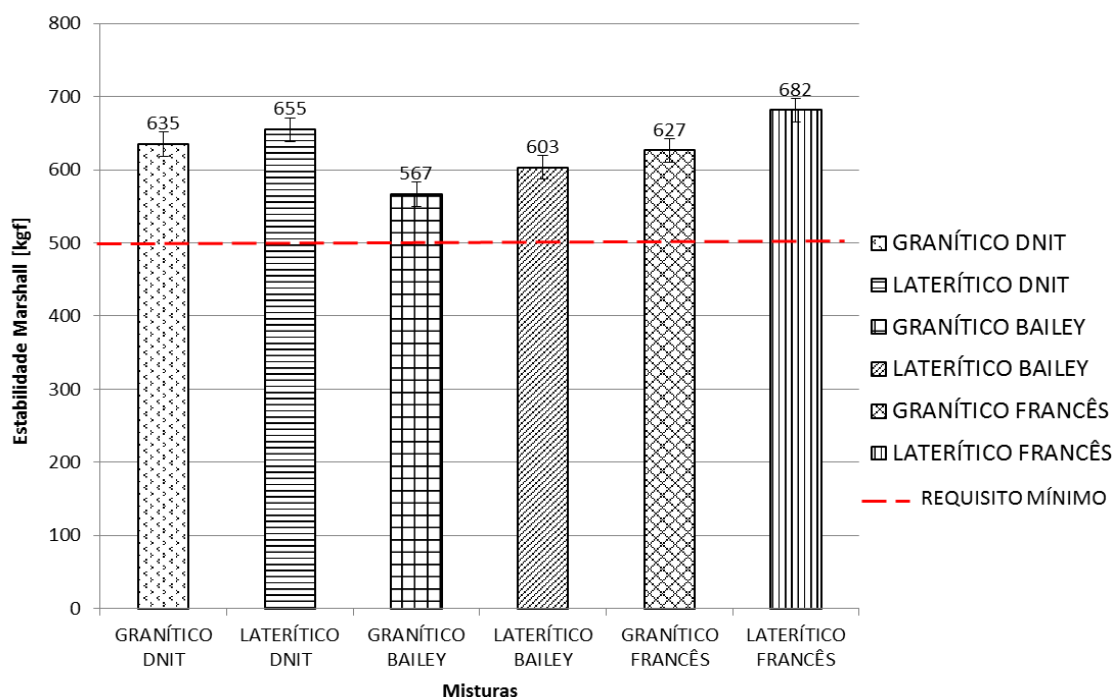
Observa-se que as misturas selecionadas pela metodologia Bailey apresentaram valores cerca de 50% menores que as demais misturas utilizando agregados graníticos, e cerca de 20% menores utilizando agregados lateríticos. Tal resultado pode ser justificado pelo fato das misturas Bailey selecionadas terem apresentado parâmetros GAF elevados, fato que proporciona um valor mais alto de porção fina do agregado na mistura; isso faz com que os agregados abaixo da PCP fiquem mais compactados e não preencham todos os vazios necessários para que haja um intertravamento adequado, o que produz uma mistura potencialmente menos resistente.

As características de forma, angularidade e textura dos agregados utilizados contribuem para que as misturas avaliadas apresentem resultados satisfatórios de resistência. A angularidade classificada como subarredondada favorece o intertravamento das partículas, o que gera um esqueleto pétreo capaz de resistir melhor aos esforços mecânicos.

4.4.3 Estabilidade Marshall

Na Figura 59 estão apresentados os resultados obtidos do parâmetro estabilidade Marshall para as misturas ensaiadas. A norma DNIT 031/2006 ES adota como requisito um valor de estabilidade mínimo igual a 500 kgf. Observa-se na Figura 61 que todas as misturas estudadas apresentam resistência equivalente e valores de estabilidade superiores ao mínimo exigido.

Figura 59 - Gráfico Estabilidade Marshall × Tipo de Mistura.



O valor de estabilidade da mistura laterítico Francês foi superior ao da mistura utilizando agregado granítico. Segundo Borborema (2007) a estabilidade Marshall é influenciada por fatores como a textura superficial e quantidade de ligante.

Uma quantidade maior de ligante na mistura eleva os valores obtidos para este parâmetro; dessa forma, é possível explicar os valores de estabilidade mais elevados para as misturas executadas com agregados lateríticos, uma vez que essas misturas possuíam teores mais elevados de ligante asfáltico.

Observando o aspecto da textura, tem-se que, embora o agregado laterítico tenha sido classificado como de baixa rugosidade, sua porosidade é elevada, o que faz com que uma

maior quantidade de ligante penetre em sua estrutura, fortalecendo as ligações e melhorando o parâmetro Marshall.

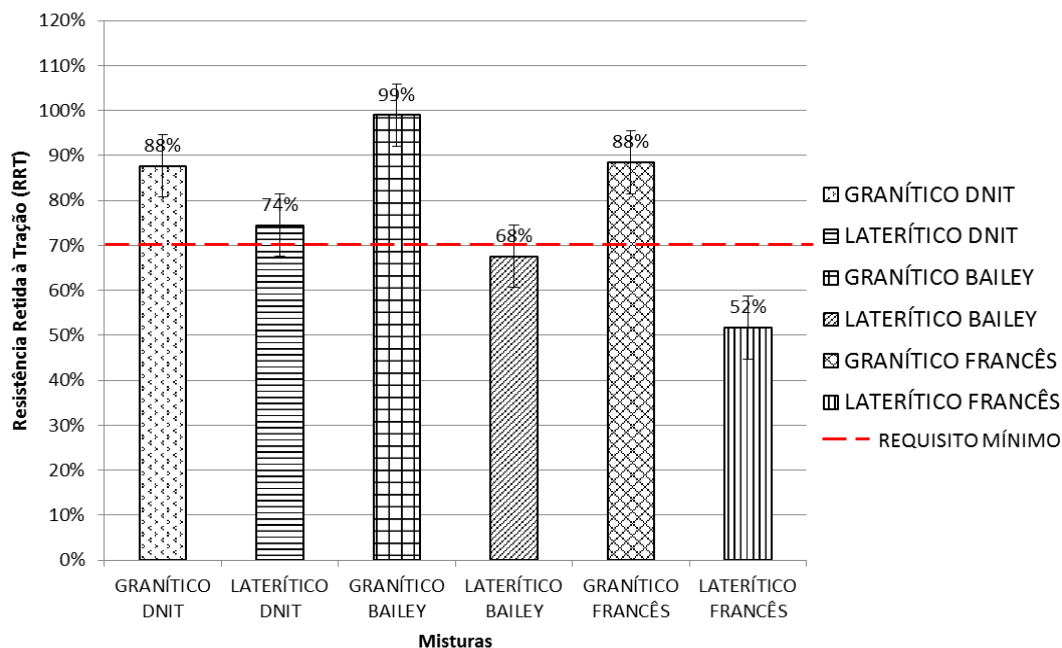
A escolha de curvas granulométricas com distribuição adequada para compor as misturas favoreceu os resultados de estabilidade, uma vez que os agregados são selecionados em porcentagens adequadas para uniformizar as curvas.

4.4.4 Dano por Umidade Induzida (*LOTTMAN Modificado*)

Na Figura 60 estão representados os resultados do ensaio de Lottman Modificado para as seis misturas estudadas. A norma AASHTO T 283/2002 adota como requisito mínimo para misturas um valor de Resistência Retida à Tração (RRT) igual a 70%.

Observa-se que as misturas utilizando agregados graníticos apresentaram resultados satisfatórios, uma vez que os valores de RRT de todas elas são superiores ao mínimo estabelecido em norma. Para as misturas utilizando agregados lateríticos, apenas a mistura do método DNIT apresentou resultado dentro do estabelecido por norma. Esses resultados podem ser explicados e justificados pela alta absorção que o agregado laterítico apresenta, favorecendo dessa forma a presença de água na mistura, e, conseqüentemente, alterando os resultados para o dano por umidade induzida.

Figura 60 - Gráfico Resistência à Tração Retida × Tipo de Mistura.



Anitelli (2013) explica que a absorção do ligante pelo agregado pode não ser favorável ao comportamento das misturas asfálticas, uma vez que diminui a espessura da película de asfalto, tornando-as mais suscetíveis às tensões, ao envelhecimento e as intempéries, especialmente a ação da água. Dessa forma, a redução nos valores de RRT das misturas nas quais foram utilizados agregados lateríticos pode ser explicada principalmente pela absorção elevada apresentada pelo agregado, característica inerente à sua origem e composição.

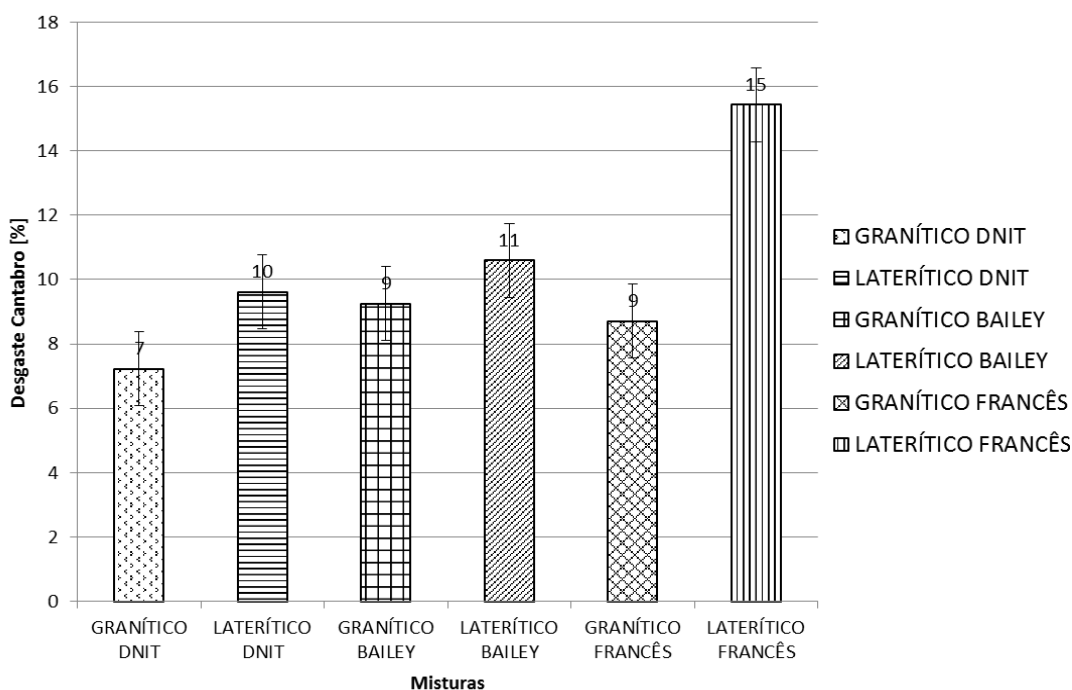
A mistura Granítico Bailey apresentou o melhor resultado de RRT; nesta mistura há uma maior quantidade de agregados de maior tamanho máximo nominal formando o esqueleto pétreo da mistura, a combinação desses agregados possivelmente possibilitou um melhor intertravamento, bem como o melhor escoamento da água dos vazios, evitando assim que houvesse influência na RRT.

4.4.5 Cântabro

O dano por abrasão das misturas avaliadas foi verificado pela perda de massa a partir do desgaste cântabro. Na Figura 61 estão ilustrados os resultados obtidos para as seis misturas avaliadas.

A norma DNIT-ES 383/99 adota como requisito um valor de desgaste Cântabro máximo de 25%. Todas as misturas estudadas atenderam às especificações da norma, apresentando resultados de desgaste cântabro inferiores ao máximo estabelecido.

Figura 61 - Gráfico Desgaste Cântabro × Tipo de Mistura.



O desgaste cântabro avalia a resistência à desagregação da mistura e é influenciado fortemente pelo tipo de agregado que a compõe; dessa forma é compreensível que as misturas utilizando agregados lateríticos tenham apresentado maior desgaste, uma vez que tais agregados são oriundos de processos de forte intemperismo, tornando-se mais frágeis.

A mistura laterítico Francês foi a que apresentou maior valor de desgaste cântabro. Tal resultado pode ser explicado observando que esta mistura foi a que utilizou menor teor de ligante para o agregado laterítico. A redução no teor de ligante afeta a ligação entre as partículas e conseqüentemente a resistência à desagregação. Como os agregados lateríticos

possuem maior índice de absorção, necessitam de uma quantidade de ligante maior para proporcionar uma cimentação adequada dos grãos.

Outro ponto a ser observado é o de que os agregados lateríticos apresentaram classificação morfológica quanto à forma e textura insatisfatórias; tal fato corrobora a redução na aderência entre o ligante e as partículas, o que leva a mistura a necessitar de mais ligante e a torna mais susceptível ao desgaste.

4.4.6 Módulo de Resiliência (MR)

Nas Figuras 62, 63, 64 e 65 estão ilustrados os resultados do módulo de resiliência das misturas obtidos à 4°C, 21°C, 25°C e 37°C respectivamente.

Figura 62 - Gráfico Módulo de Resiliência à 4°C × Tipo de Mistura.

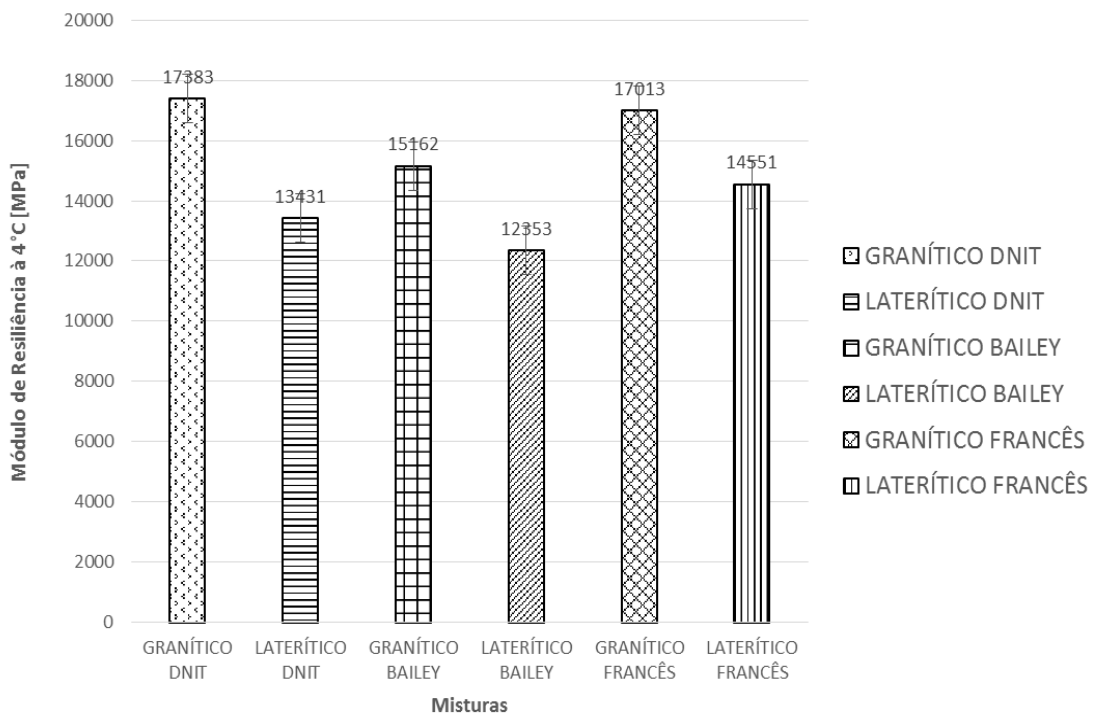


Figura 63 - Gráfico Módulo de Resiliência à 21°C × Tipo de Mistura.

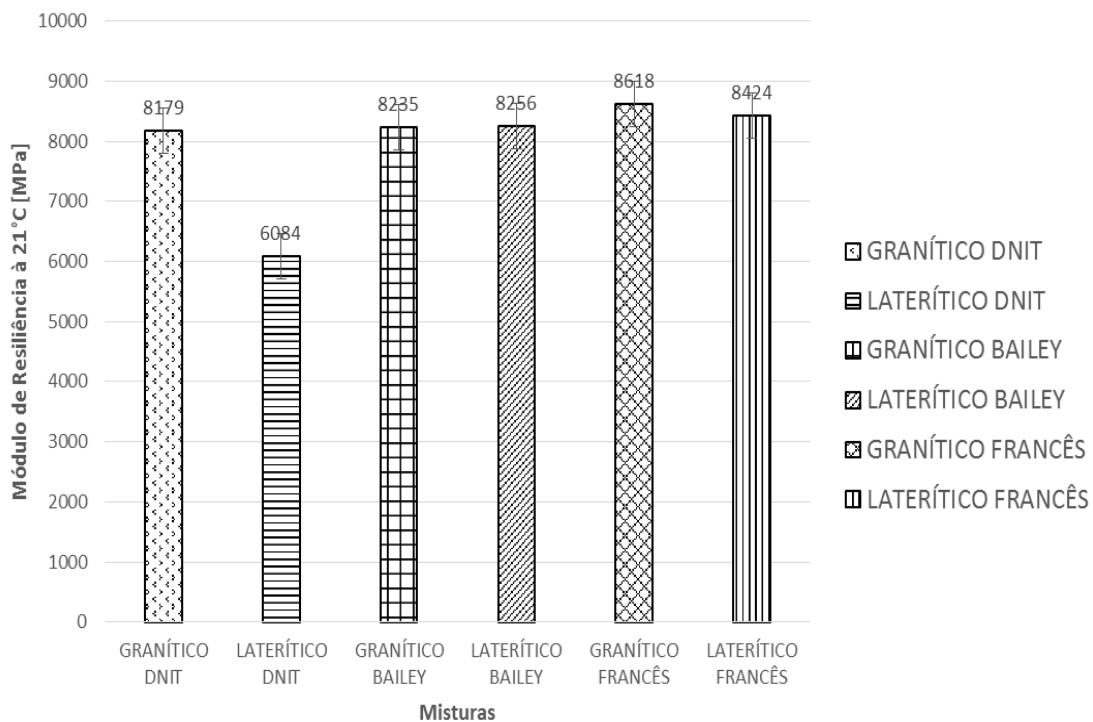


Figura 64 - Gráfico Módulo de Resiliência à 25°C × Tipo de Mistura.

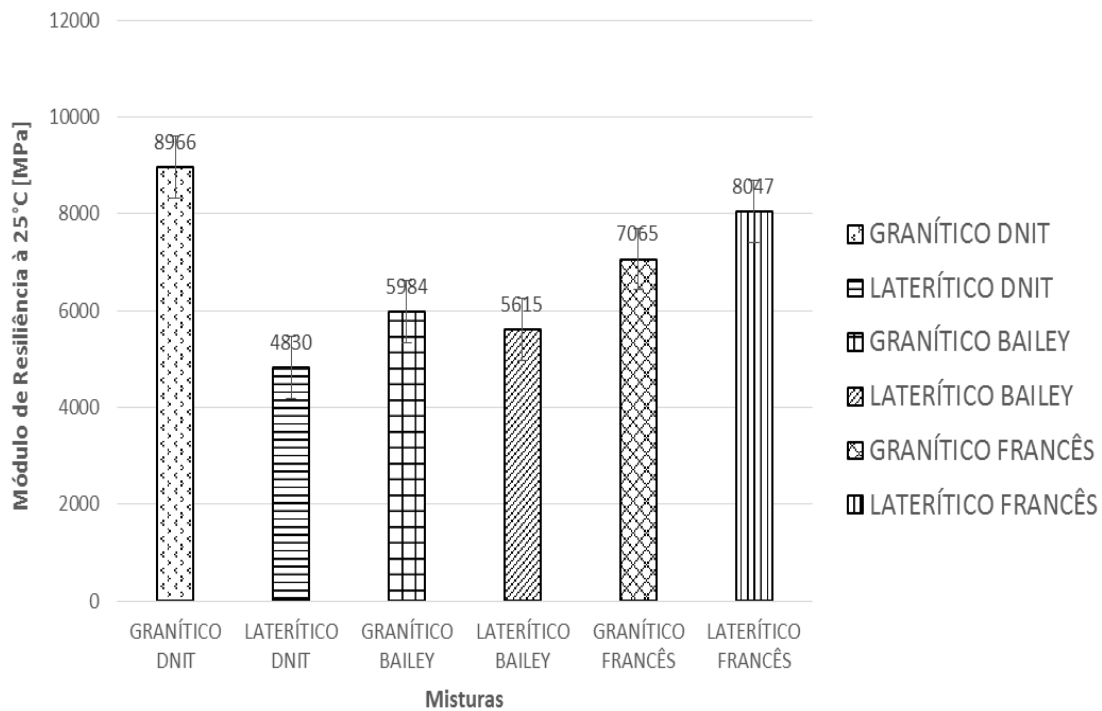
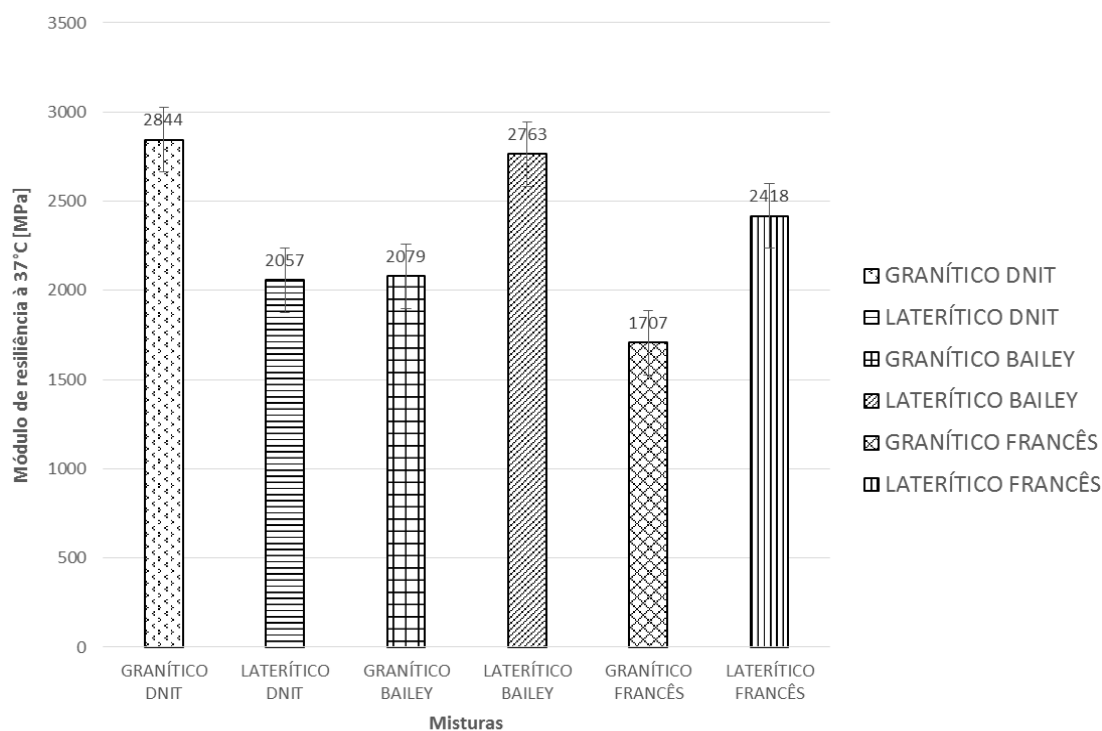


Figura 65 - Gráfico Módulo de Resiliência à 37°C × Tipo de Mistura.



Para a temperatura de 25°C, os valores de módulo de resiliência encontrados estão entre 4830 e 8965 MPa, atendendo dessa forma a faixa de trabalho usual para misturas convencionais. As misturas DNIT e Bailey, que utilizaram agregados lateríticos apresentaram valores de MR inferiores às mesmas misturas nas quais foram utilizados agregados graníticos, este comportamento ocorre devido a diminuição da rigidez provocada pelo elevado teor de ligante presente nas misturas que utilizaram agregados lateríticos.

O valor de MR mais elevado para a mistura Laterítico Francês ocorre pela distribuição granulométrica da mistura, que permite um aumento da capacidade de resistência, devido a presença de partículas maiores em maior porcentagem na mistura.

Confirmando o pressuposto por Bernucci *et al.* (2010), a diminuição das temperaturas de ensaio elevou os valores dos resultados do MR, enquanto que o aumento da temperatura reduziu os valores dos resultados.

Avaliando os resultados, e considerando a temperatura de 25°C como referência, tem-se que para as amostras submetidas ao ensaio a 37°C houve uma redução do valor do MR de cerca de 70% para as misturas utilizando agregado granítico e de cerca de 50% para as misturas utilizando agregados lateríticos. Para as amostras submetidas ao ensaio a 4°C

houve aumento do valor do MR de cerca de 94%, 153% e 140% para as misturas utilizando agregados graníticos DNIT, Bailey e Francês respectivamente; e de 178%, 120% e 81% para as misturas utilizando agregados lateríticos DNIT, Bailey e Francês respectivamente.

As temperaturas mais elevadas utilizadas na pesquisa (37°C) são facilmente atingidas em épocas de verão no pavimento da maioria das regiões brasileiras, enquanto no inverno as temperaturas mais baixas (4°C) também são facilmente verificadas nas regiões sul do país.

A partir deste comparativo do comportamento do MR para temperaturas distintas, tem-se que, com diminuição da temperatura, ocorre o aumento da rigidez, que causa a degradação de fissuras e intensifica a fadiga do revestimento; já com o aumento da temperatura ocorre a diminuição da rigidez, conseqüentemente a degradação precoce, como por exemplo a deformação permanente.

Embora o MR faça referência ao módulo de elasticidade das misturas e esteja diretamente relacionado à rigidez, não necessariamente um elevado valor de rigidez corresponde a uma elevada resistência. Deve-se ater que, em algumas situações, materiais mais frágeis podem apresentar maior dureza e menor resistência, enquanto que materiais mais flexíveis podem apresentar baixa dureza e elevada resistência.

4.4.7 Fadiga por Compressão Diametral à Tensão Controlada

Para determinar a vida de fadiga das misturas foram comparados os parâmetros deformação de tensões ($\Delta\sigma$) e deformação específica resiliente (ϵ_i) com o número de ciclos suportados (N), até que ocorresse a ruptura. Nas Figuras 66, 67, 68, 69, 70 e 71 estão ilustradas as curvas de vida de fadiga $\Delta\sigma \times N$ e $\epsilon_i \times N$ para cada uma das misturas estudadas e nas Figuras 72 e 73 estão ilustradas todas as curvas.

A partir de cada uma das curvas foi possível gerar as equações correspondentes às linhas de tendência obtidas das quais se obteve os parâmetros K1, n1, K2 e n2, bem como relacionar o coeficiente R², a partir do qual foi possível avaliar a qualidade do ajuste e a representatividade dos pontos ensaiados. Na Tabela 30 estão descritos os valores dos parâmetros de cada mistura.

Figura 66 - Gráfico Vida de Fadiga × Diferença de Tensões - misturas do método DNIT.

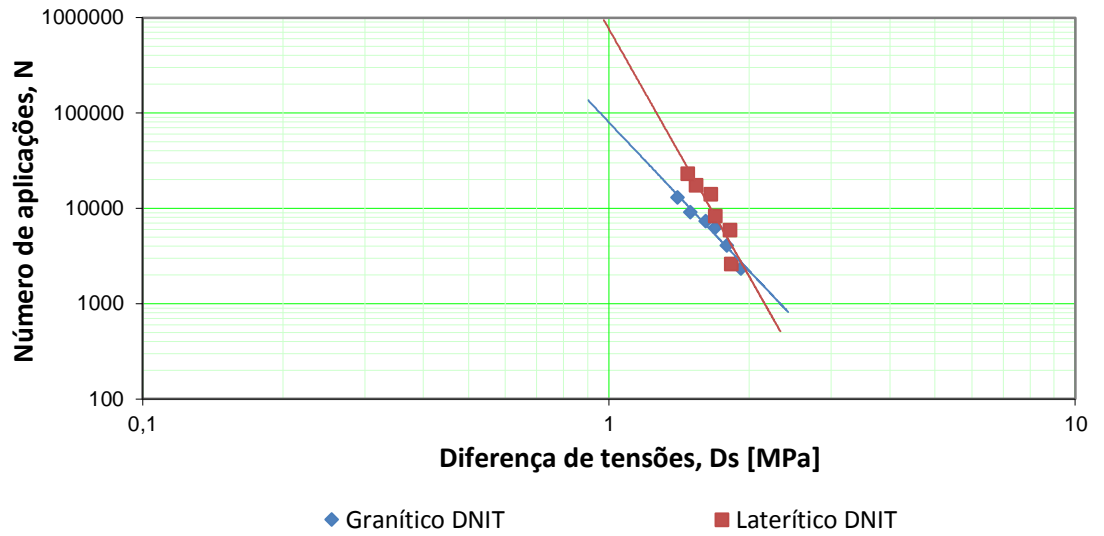


Figura 67 - Gráfico Vida de Fadiga × Deformação Específica Resiliente - misturas do método DNIT.

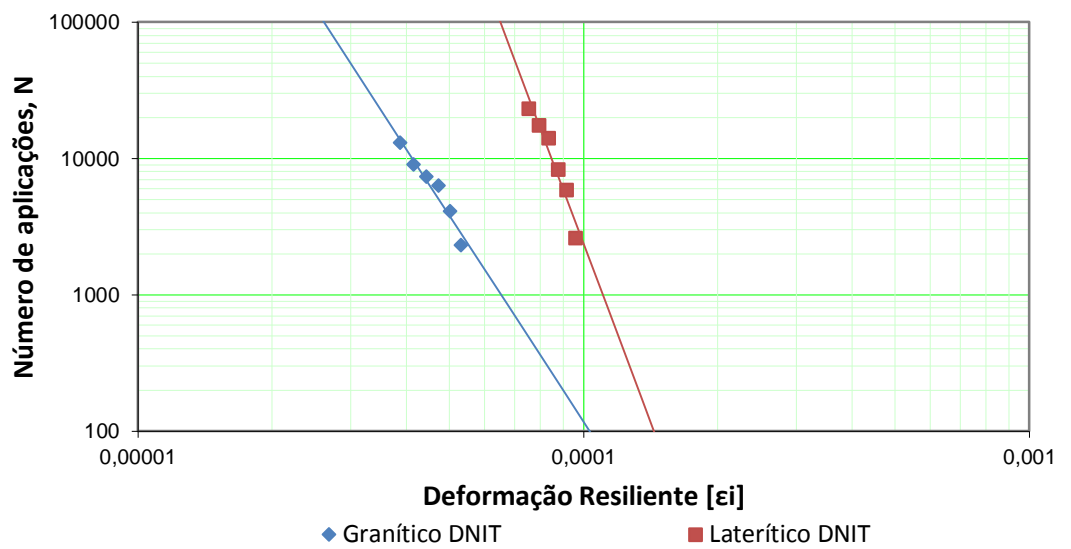


Figura 68 - Gráfico Vida de Fadiga × Diferença de Tensões - misturas do método Bailey.

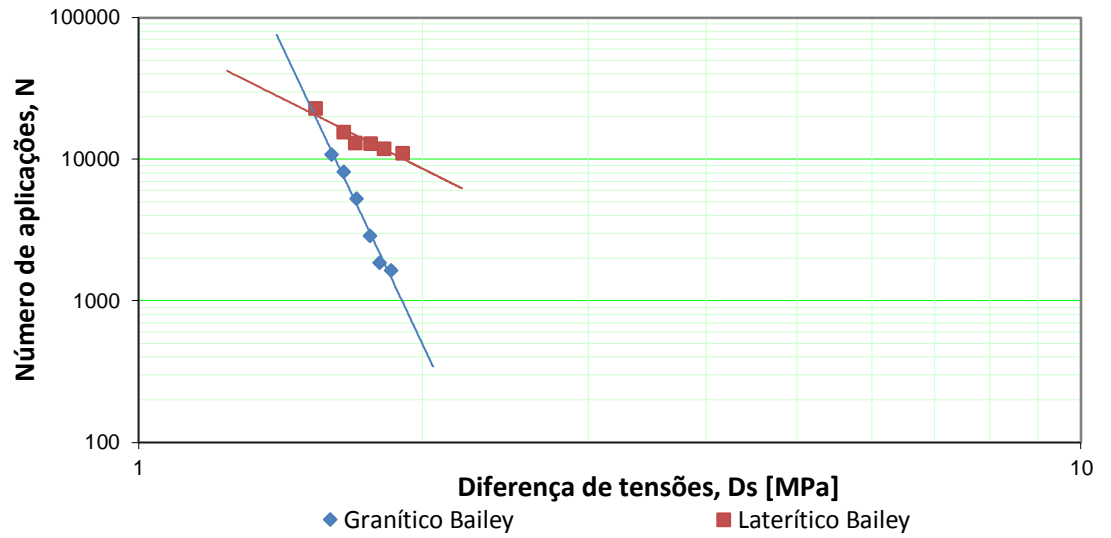


Figura 69 - Gráfico Vida de Fadiga × Deformação Específica Resiliente - misturas do método Bailey.

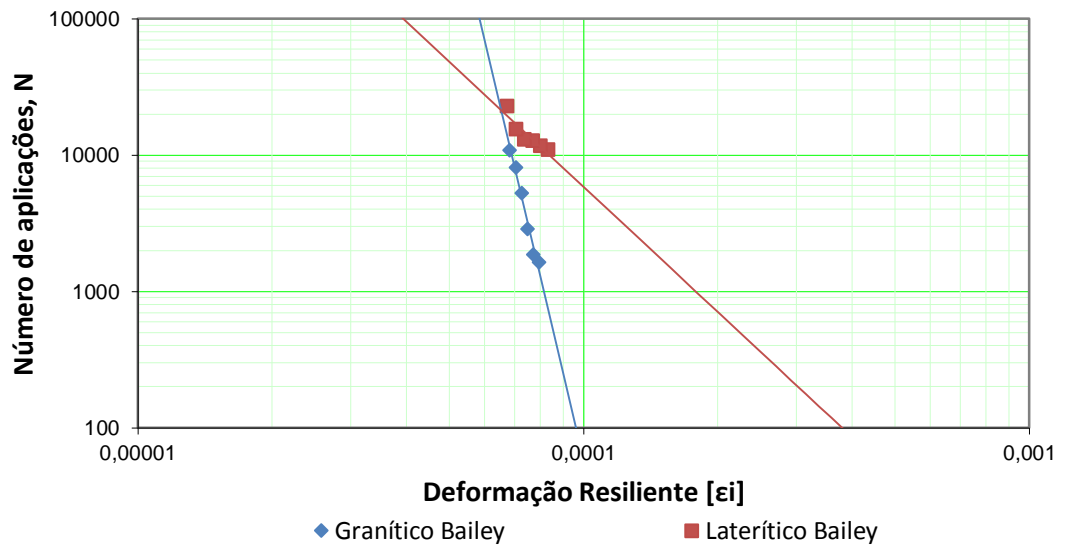


Figura 70 - Gráfico Vida de Fadiga × Diferença de Tensões - misturas do método Francês.

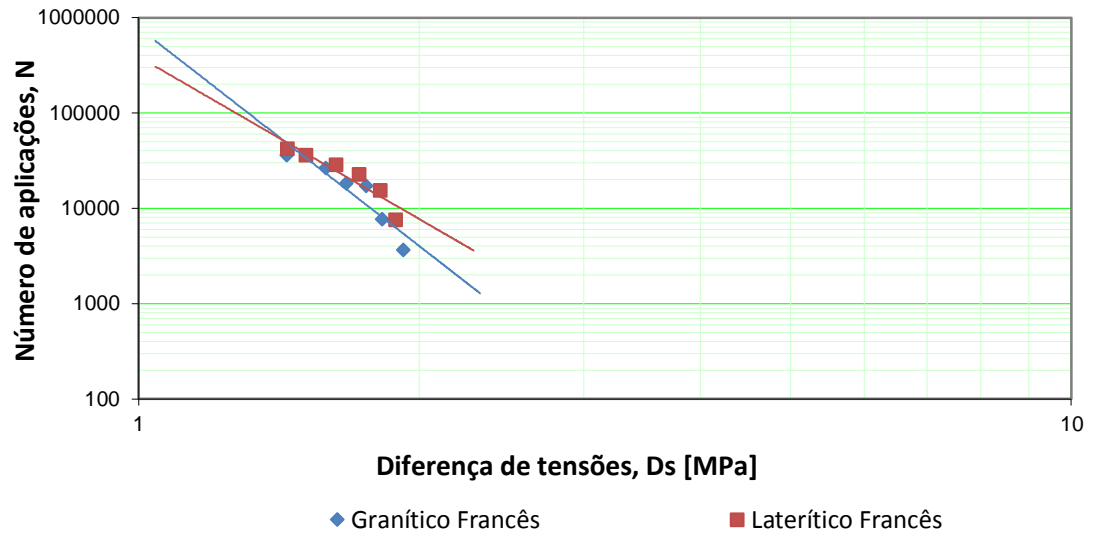


Figura 71 - Gráfico Vida de Fadiga × Deformação Específica Resiliente - misturas do método Francês.

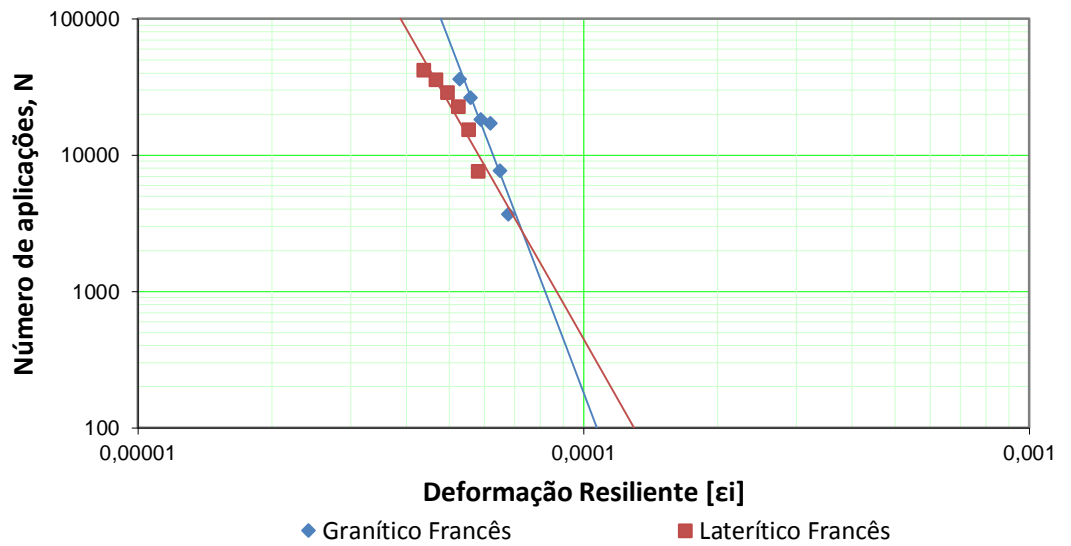


Figura 72 - Gráfico Vida de Fadiga × Diferença de Tensões – todas as misturas avaliadas.

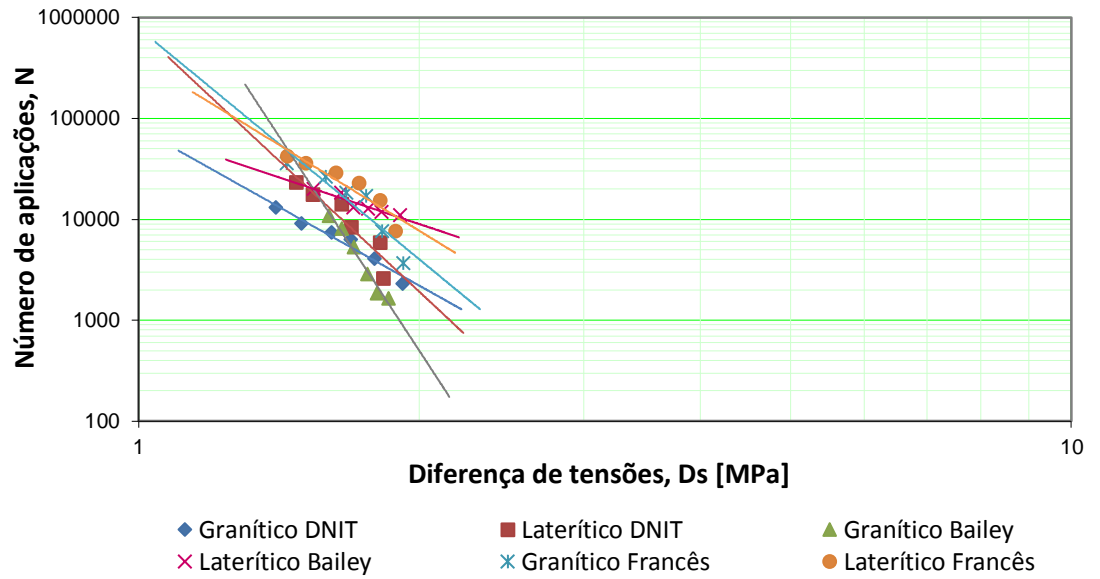


Figura 73 - Gráfico Vida de Fadiga × Deformação Específica Resiliente – todas as misturas avaliadas.

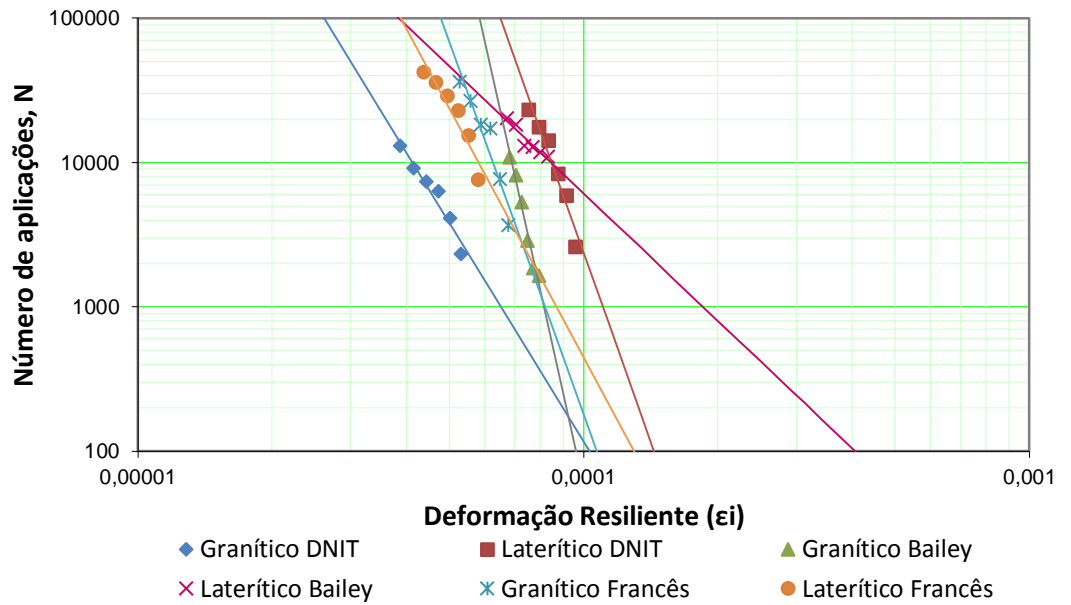


Tabela 30 - Características das curvas de vida de fadiga das misturas avaliadas.

Mistura	Curva	Equação	R ²	Parâmetros	
Granítico DNIT	N × Δσ	$84020\left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{-5,37}$	0,975	K1	84020
				n1	5,37
	N × ε _i	$8 \times 10^{-20}\left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{-5,64}$	0,967	K2	8×10^{-20}
				n2	5,64
Laterítico DNIT	N × Δσ	$1 \times 10^{06}\left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{-9,69}$	0,898	K1	1×10^{06}
				n1	9,69
	N × ε _i	$7 \times 10^{-34}\left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{-9,12}$	0,946	K2	7×10^{-34}
				n2	9,12
Granítico Bailey	N × Δσ	$9 \times 10^{06}\left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{-14,13}$	0,982	K1	9×10^{06}
				n1	14,13
	N × ε _i	$2 \times 10^{-54}\left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{-13,86}$	0,978	K2	2×10^{-54}
				n2	13,86
Laterítico Bailey	N × Δσ	$86441\left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{-3,33}$	0,890	K1	86441
				n1	3,33
	N × ε _i	$4 \times 10^{-09}\left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{-3,05}$	0,844	K2	4×10^{-09}
				n2	3,05
Granítico Francês	N × Δσ	$783349\left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{-7,61}$	0,865	K1	783349
				n1	7,61
	N × ε _i	$1 \times 10^{-32}\left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{-8,57}$	0,910	K2	1×10^{-32}
				n2	8,57
Laterítico Francês	N × Δσ	$389170\left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{-5,66}$	0,875	K1	389170
				n1	5,66
	N × ε _i	$6 \times 10^{-21}\left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{-5,72}$	0,899	K2	6×10^{-21}
				n2	5,72

Observando as Figuras 66, 67, 68, 69, 70 e 71 é possível verificar que todas as misturas apresentaram variações uniformes para N, o que indica que as cargas aplicadas são representativas. Nas Figuras 72 e 73 é possível verificar que as misturas selecionadas pelo método francês apresentaram maiores valores de N e, ao realizar o comparativo observando o tipo de agregado empregado, constata-se que as misturas utilizando agregado laterítico obtiveram melhor desempenho que as misturas utilizando agregado granítico, suportando um N maior em todos os métodos de seleção comparados.

Embora os níveis de tensão utilizados tenham sido distintos devido as diferenças nos valores de resistência à tração e, também, nos tempos de ensaio que seriam necessários caso os níveis de tensão semelhantes fossem ensaiados, verifica-se que há um comportamento uniforme em todas as misturas ensaiadas, levando a constatação que as diferenças de N obtidas são oriundas das resistências das misturas.

Da análise da Tabela 30 verifica-se que todas as curvas apresentaram bom coeficiente de determinação R^2 , evidenciando a qualidade do ajuste dos modelos em relação aos pontos observados. As curvas granítico DNIT e granítico Bailey foram as que apresentaram menor dispersão, ou seja, valores de R^2 mais próximos de 1, enquanto que as curvas granítico francês e laterítico francês foram as que apresentaram os menores coeficientes.

As misturas utilizando agregados lateríticos apresentaram melhor desempenho à vida de fadiga que as misturas utilizando agregados graníticos. A quantidade de finos mais elevada presente nessas misturas e a maior quantidade de ligante explica os resultados, considerando que tais fatores tornam a mistura menos rígida e resistindo melhor aos danos por fadiga.

Merighi (2015) explica que fatores como o volume de vazios e a disposição da matriz de agregados influenciam diretamente nos resultados da vida de fadiga. Por isso os resultados das misturas selecionadas granulométricamente por métodos distintos são característicos.

Para análise dos gráficos de diferença de tensões, Morilha Junior (2004) classificou a vida de fadiga de misturas asfálticas em laboratório a partir de um critério que classifica os resultados de acordo com os níveis de tensão atingidos. O método classifica os resultados em três níveis de diferença de tensões: 0,5 MPa (nível baixo); 1,0 MPa (nível médio) e 2,0 MPa (nível alto); desta análise as misturas avaliadas são rotuladas.

Todas as misturas ficaram classificadas no mesmo nível de tensões, uma vez que atingiram o nível alto. A mistura Laterítico Francês foi a que apresentou o melhor comportamento frente aos níveis de tensão a que foi submetida. A mistura Granítico Francês foi a mistura que, utilizando agregados graníticos, conseguiu atingir melhores resultados.

De Cezaro Junior (2008) explica que o coeficiente “ n ” indica a inclinação da curva, e que para os gráficos de diferença de tensões “ n_1 ” indica a susceptibilidade ao estado de

tensões, ou seja, maiores valores indicam maior sensibilidade do comportamento de fadiga das misturas em relação às variações na diferença de tensões. Assim, de acordo com os dados da Tabela 40, as misturas Granítico Bailey e Laterítico DNIT são as que apresentam maiores valores de “ n_1 ”, sendo dessa forma consideradas mais suscetíveis às variações do estado de tensões.

As misturas Laterítico Bailey e Granítico DNIT são as que apresentaram menores valores para este parâmetro, sendo assim menos suscetíveis às variações de tensão. Magalhães (2004) explica que uma maior susceptibilidade reflete no maior risco de a mistura sofrer trincamento prematuro devido falhas no projeto ou execução, ou seja, misturas com essas características ficam mais propensas a sofrer redução expressiva na vida de fadiga.

A análise dos gráficos de vida de fadiga *versus* deformação específica resiliente pondera a interferência do módulo de resiliência inicial da mistura. A partir da análise do coeficiente de inclinação “ n_2 ” das curvas, nota-se comportamento semelhante ao observado na análise das curvas vida de fadiga \times diferença de tensões.

Analogamente ao sugerido para analisar a fadiga em função da diferença de tensões, adotou-se três níveis de deformações de resiliência propostos por De Cezaro Junior (2008): 2.10^{-5} cm/cm (nível baixo); 4.10^{-5} cm/cm (nível médio) e 6.10^{-5} cm/cm (nível alto). Da análise destes valores foi possível hierarquizar as misturas quanto à vida de fadiga em função da deformação específica resiliente.

As misturas Laterítico Bailey e Granítico DNIT foram as que apresentaram menores valores para o parâmetro “ n_2 ”, sendo assim suas deformações resilientes menos suscetíveis às variações de tensão.

A extrapolação das linhas de tendência das curvas analisadas permite observar que as equações e parâmetros obtidos são representativos das misturas. Todas as extrapolações indicam que os pontos obtidos seguem o comportamento representado pelas curvas e seus parâmetros.

4.4.8 Módulo Dinâmico ($|E^*|$)

Por meio do processo de superposição tempo temperatura, na temperatura de referência de 21°C, foram elaboradas as curvas mestras das misturas asfálticas a partir dos dados de módulo dinâmico obtidos nas três temperaturas e seis frequências. Nas Figuras 74, 75, 76, 77, 78 e 79 estão ilustradas as curvas mestras das misturas avaliadas; na Figura 80 estão ilustradas todas as curvas mestras obtidas na pesquisa.

Figura 74 - Curva mestra da mistura Granítico DNIT.

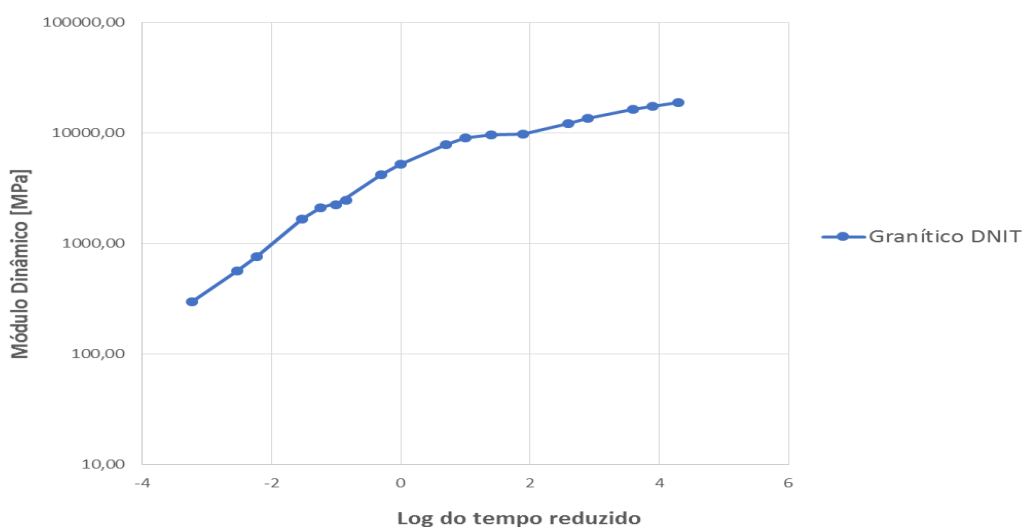


Figura 75 - Curva mestra da mistura Laterítico DNIT.

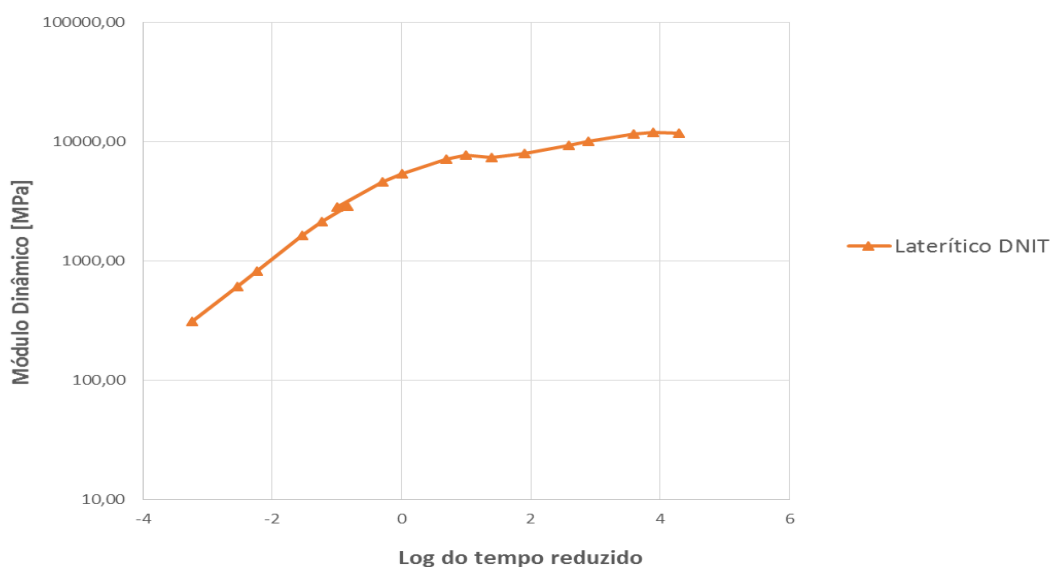


Figura 76 - Curva mestra da mistura Granítico Bailey.

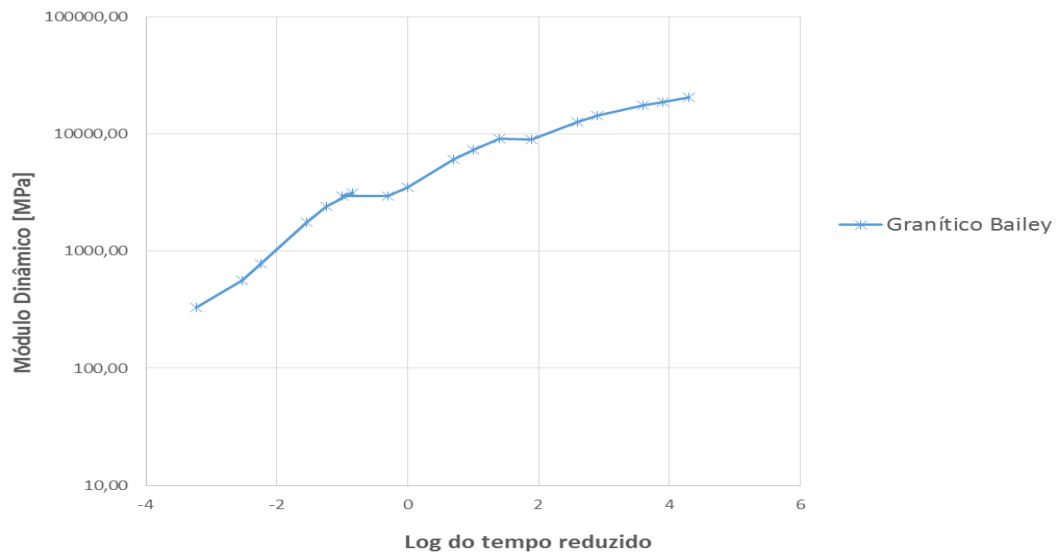


Figura 77 - Curva mestra da mistura Laterítico Bailey.

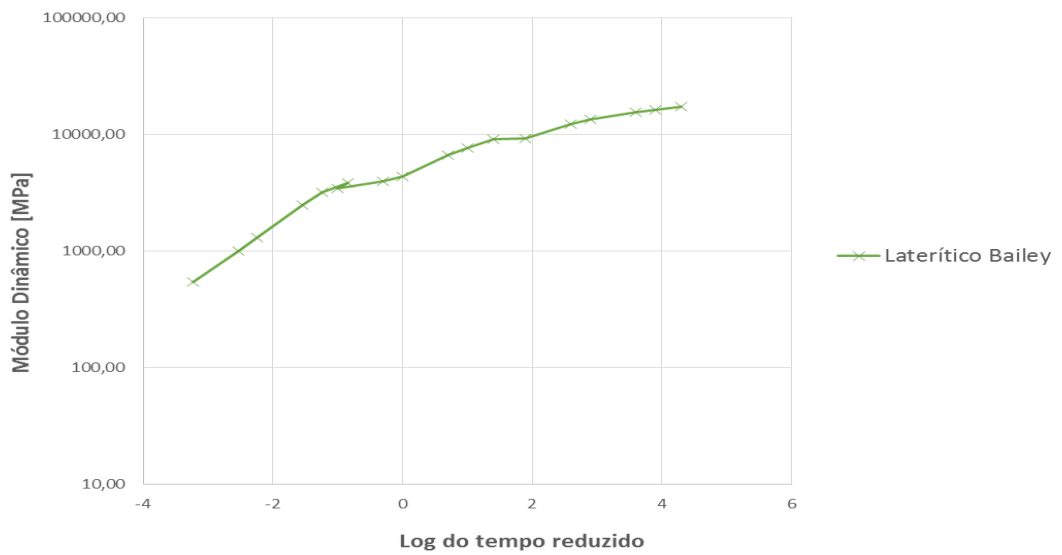


Figura 78 - Curva mestra da mistura Granítico Francês.

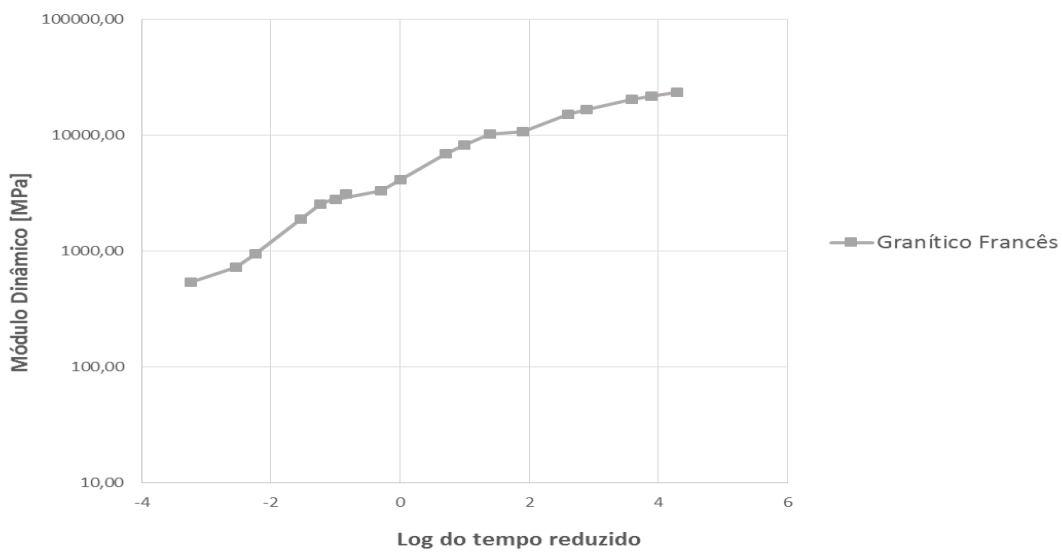


Figura 79 - Curva mestra da mistura Laterítico Francês.

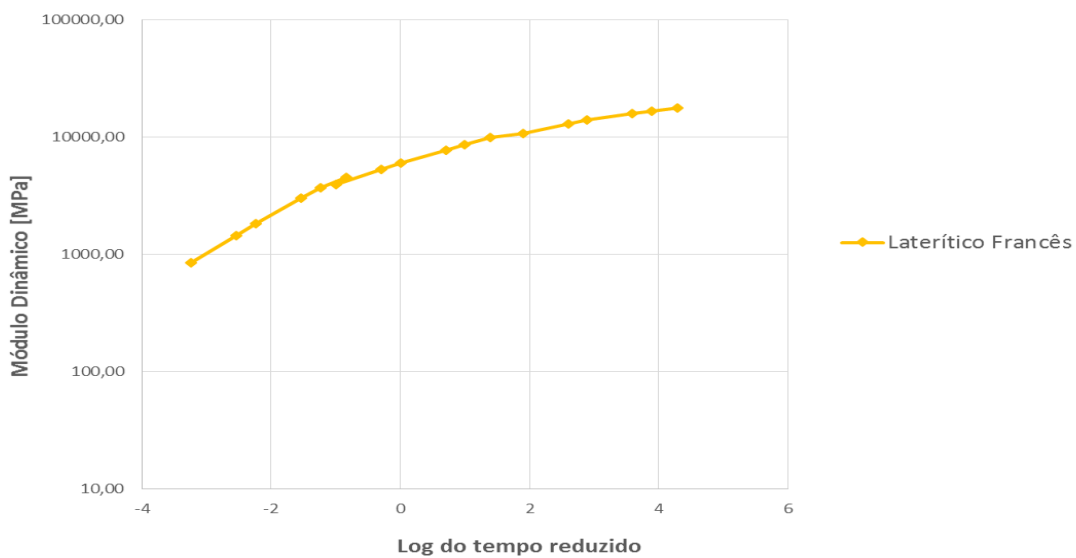
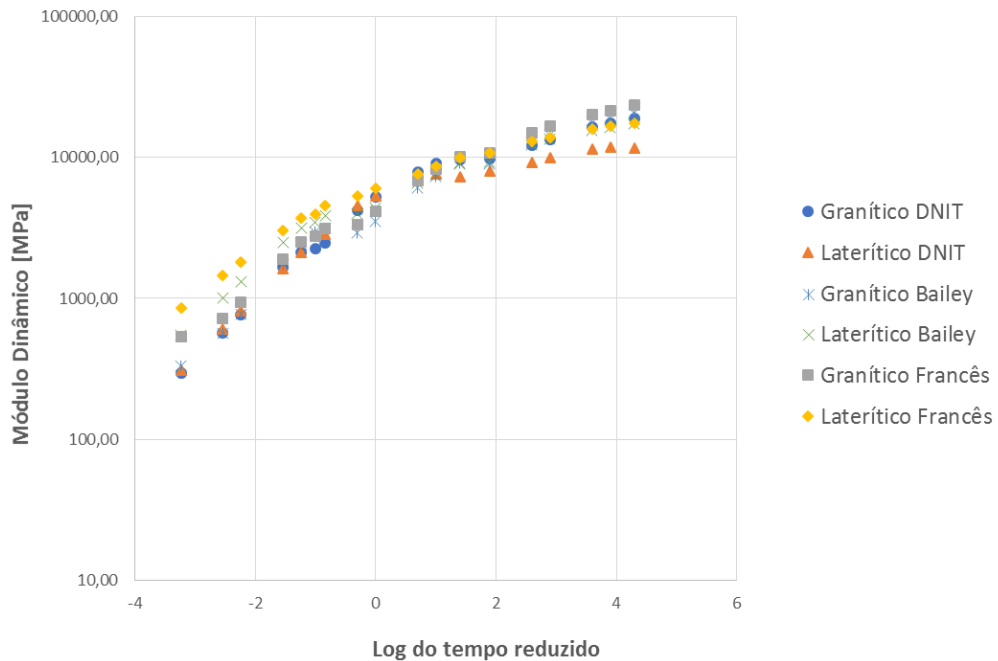


Figura 80 - Curvas Mestras de todas as misturas avaliadas.



Semelhante ao módulo de resiliência, por ser uma medida da rigidez, o módulo dinâmico também tem seus resultados influenciados pela temperatura. Nas curvas das misturas avaliadas é possível verificar comportamento análogo ao ocorrido quanto ao módulo de resiliência, todas as misturas apresentam redução da rigidez devido ao aumento de temperatura.

Nas Figuras 74, 75, 76, 77, 78 e 79 é possível verificar que todas as misturas avaliadas atenderam à mesma tendência de comportamento, tanto quanto a temperatura como em relação a variação de frequências. Na Figura 80, semelhante as demais curvas mestra, observa-se que a rigidez das misturas diminui à medida que a frequência de aplicação da carga diminui.

Os resultados do ensaio de módulo dinâmico para todas as misturas também foram plotados em gráficos por temperatura de ensaio conforme ilustram as Figuras 81, 82 e 83.

Figura 81 - Módulo Dinâmico das misturas avaliadas à 4°C.

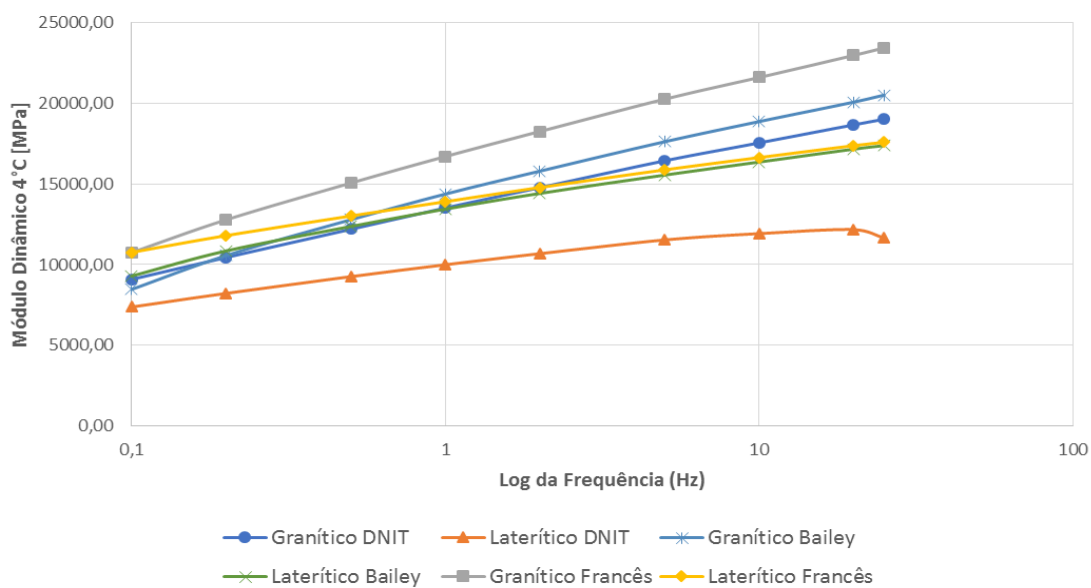


Figura 82 - Módulo Dinâmico das misturas avaliadas à 21°C.

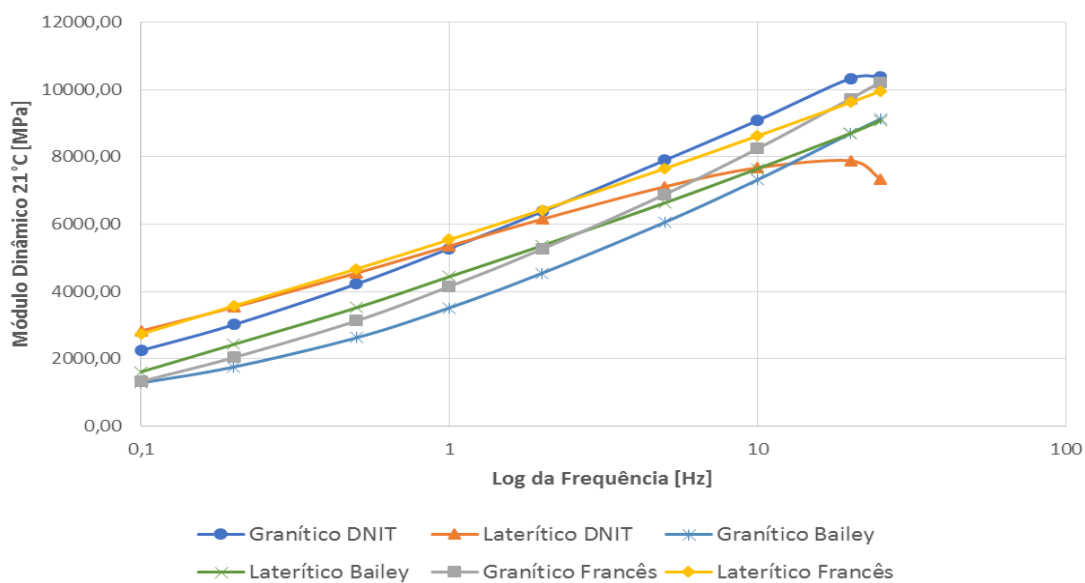
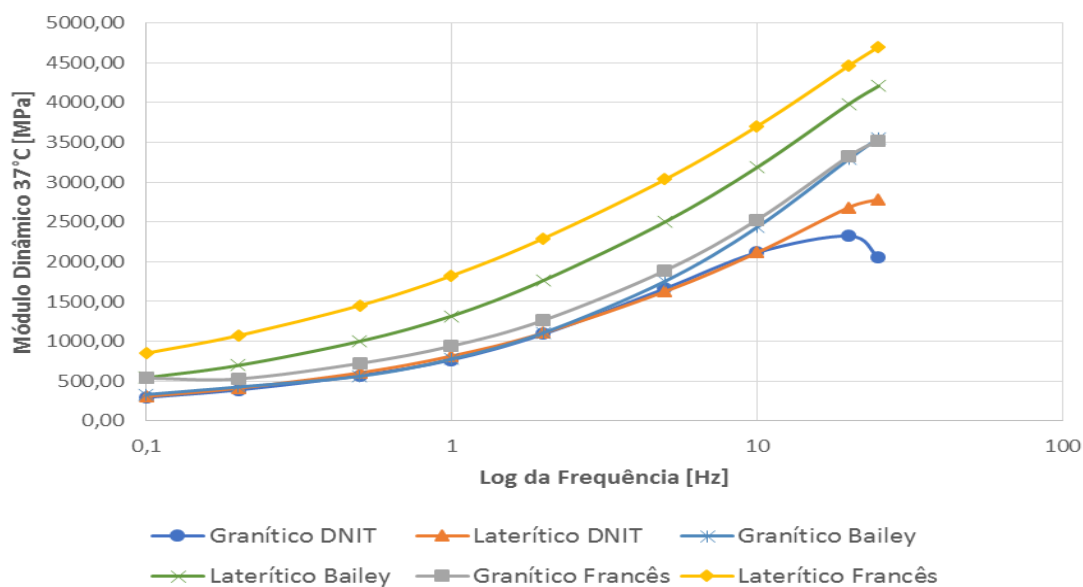


Figura 83 - Módulo Dinâmico das misturas avaliadas à 37°C.



A mistura granítico Francês foi a que apresentou maior rigidez para a menor temperatura, enquanto a mistura laterítico Francês apresentou valores de rigidez mais elevados para a temperatura mais alta. Todas as misturas apresentaram valor de módulo pelo menos 10 vezes menor para as temperaturas mais altas.

Observa-se desses resultados que as misturas utilizando os agregados lateríticos apresentaram comportamento semelhante às que utilizaram agregados graníticos. Onofre (2012) e Gouveia *et al.* (2016) explicam que o teor de ligante e a curva granulométrica da mistura influenciam na rigidez do material. Teores mais elevados de ligante e curvas mal graduadas contribuem para a redução dos valores de rigidez.

Confirma-se essa tendência ao verificar que a mistura laterítico DNIT que utilizou um maior teor de ligante, apresenta os menores valores de módulo, mesmo na temperatura mais baixa. Ao mesmo tempo, admite-se que as misturas que utilizaram agregados lateríticos sofreram influência direta das curvas granulométricas selecionadas.

O ângulo de fase (diferença entre o pulso de tensão e o pulso de deformação) é uma propriedade viscoelástica do material, valores mais elevados indicam maior viscosidade e menor elasticidade. Do ensaio de módulo dinâmico obteve-se também os gráficos que relacionam os ângulos de fase às frequências de ensaio para cada temperatura, conforme ilustram as Figuras 84, 85 e 86.

Figura 84 - Ângulos de Fase referentes as frequências de carregamento na temperatura de 4°C.

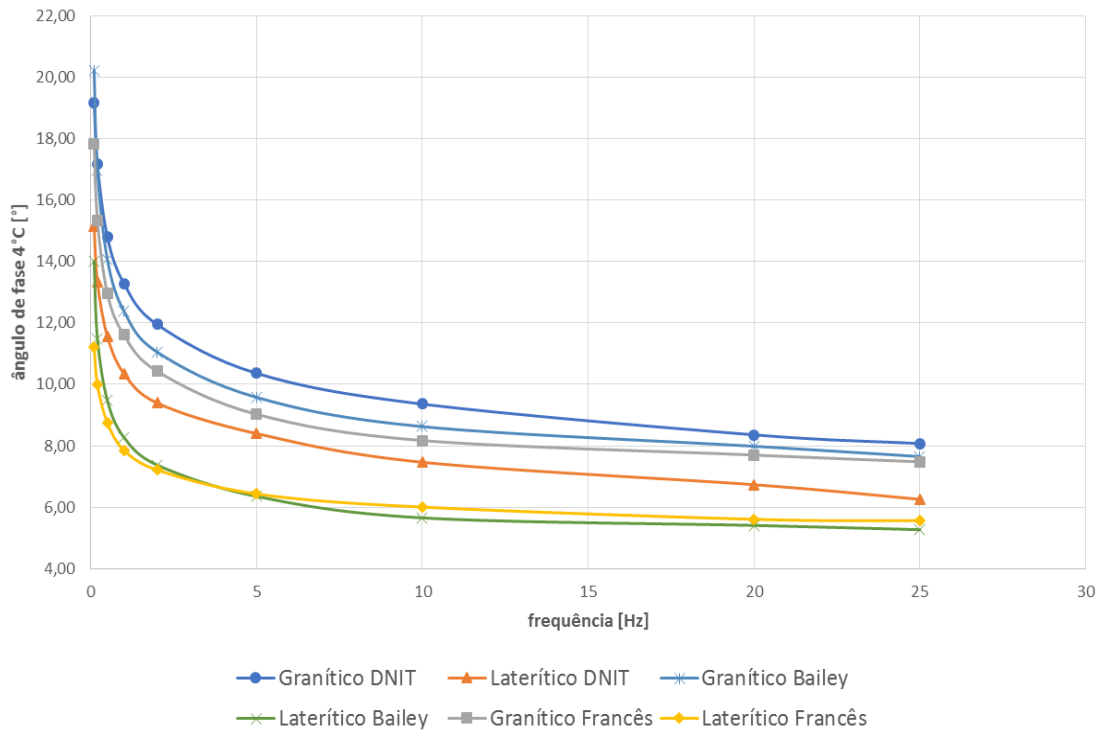


Figura 85 - Ângulos de Fase referentes as frequências de carregamento na temperatura de 21°C.

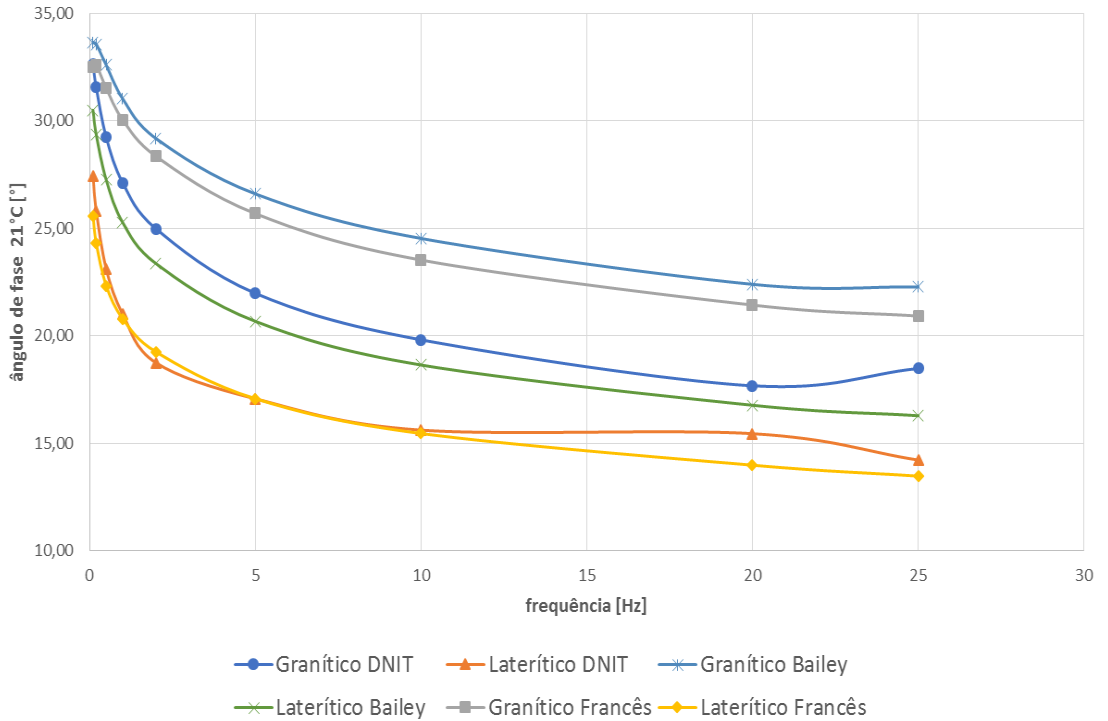
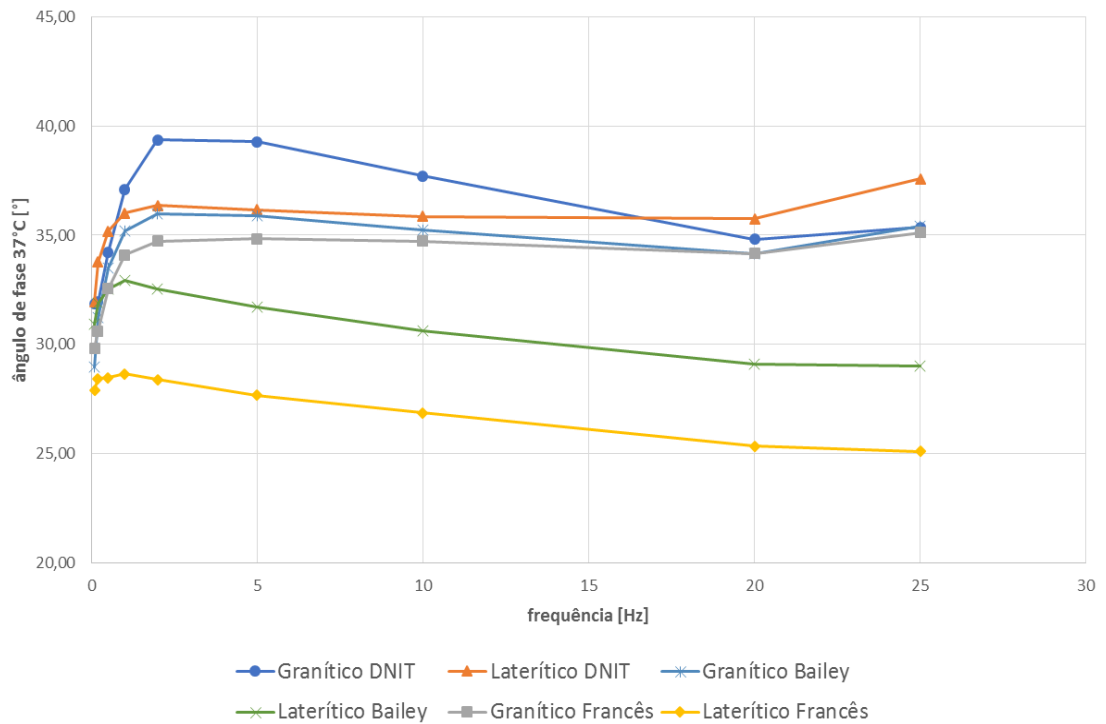


Figura 86 - Ângulos de Fase referentes as frequências de carregamento na temperatura de 37°C.



Para as temperaturas de 4°C e 21°C observa-se que ocorre a diminuição do ângulo de fase com o aumento da frequência e da temperatura. No entanto, essa tendência não se confirma na temperatura de 37°C na qual há aumento do ângulo de fase com o aumento da frequência. Otto (2009) explica que esse fenômeno está relacionado à presença dos agregados na mistura, ou seja, para o ligante o ângulo de fase aumenta de maneira contínua, porém, com a presença de agregados na mistura esse valor tende a ter um aumento com o aumento da temperatura.

Ali *et al.* (2016) também esclarece que, quando se trabalha com menores temperaturas, o ângulo de fase apresenta aumento, o que sugere que a maior parte da energia é dissipada no comportamento viscoelástico da mistura, e implica dizer que a relação entre o ângulo de fase em baixa temperatura e alta frequência é atribuída ao ligante, seguindo a tendência deste. O ângulo de fase a alta temperatura e baixa frequência é afetado pela presença do agregado, e a maior parte da energia é atribuída à interação ligante-agregado que tende a diminuir o ângulo de fase.

Nas Figuras 87 e 88 estão ilustradas as curvas de módulo dinâmico e módulo de resiliência em função da temperatura para as misturas utilizando agregados graníticos e

agregados lateríticos respectivamente. A observação destas curvas permite verificar que as misturas apresentaram comportamento semelhante frente às mudanças de temperatura.

Figura 87 - Curvas representativas do módulo dinâmico e módulo de resiliência das misturas utilizando agregados graníticos.

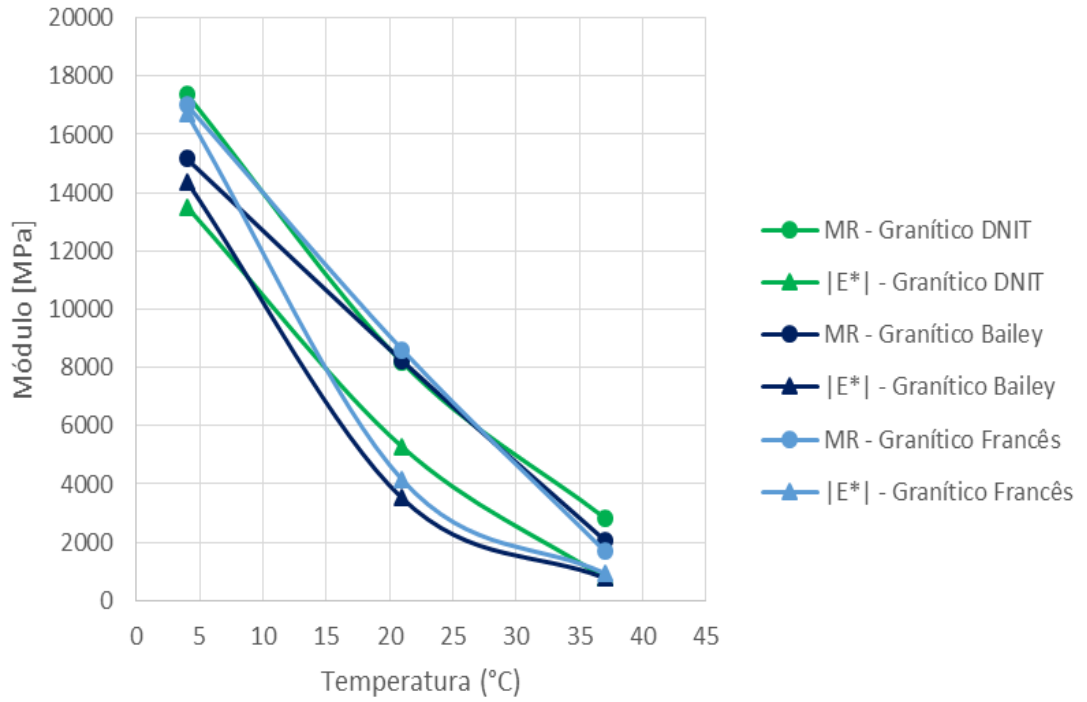
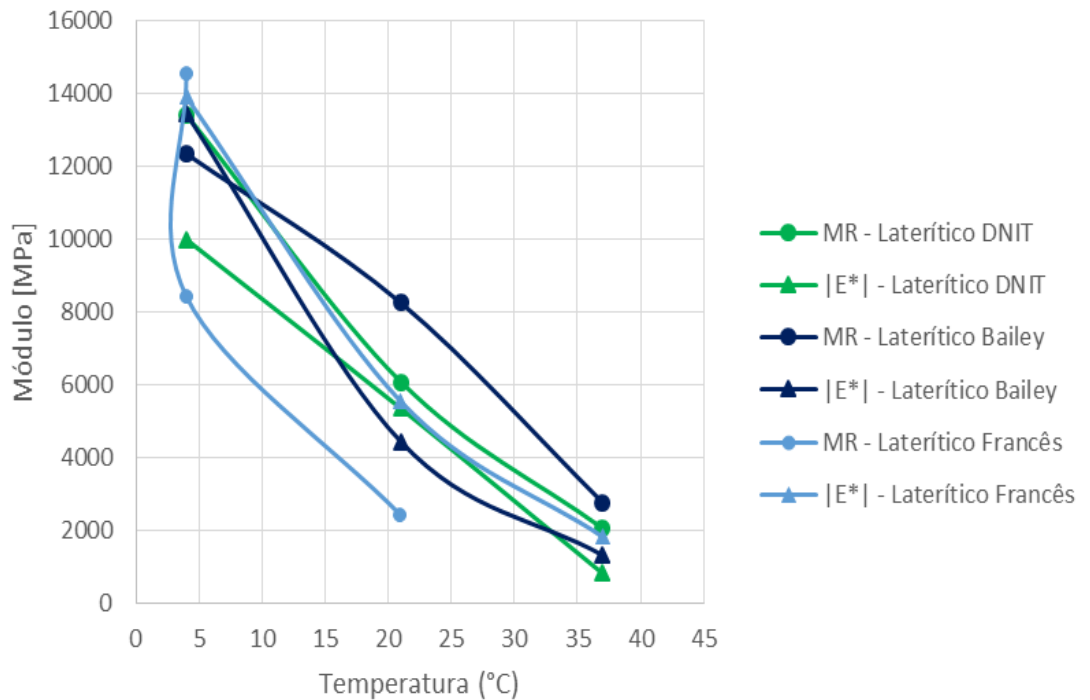


Figura 88 - Curvas representativas do módulo dinâmico e módulo de resiliência das misturas utilizando agregados lateríticos.



Observa-se nestas curvas a tendência que as misturas têm de apresentar maiores valores de rigidez para menores temperaturas. O aumento da temperatura torna as misturas mais flexíveis e assim mais susceptíveis às deformações permanentes.

Nota-se que as misturas apresentam um comportamento mais constante quando referidas pelo módulo dinâmico, no entanto, as diferenças entre MR e $|E^*|$ são pouco significativas e confirmam o comportamento viscoelástico das misturas avaliadas.

Nas Figuras 89 e 90 estão ilustrados os gráficos que relacionam os valores de $|E^*|$ e MR para os agregados graníticos e lateríticos respectivamente. Nesses gráficos estão plotadas também as equações que relacionam tais resultados.

Figura 89 - Gráfico Módulo Dinâmico \times Módulo de Resiliência para misturas utilizando agregados graníticos.

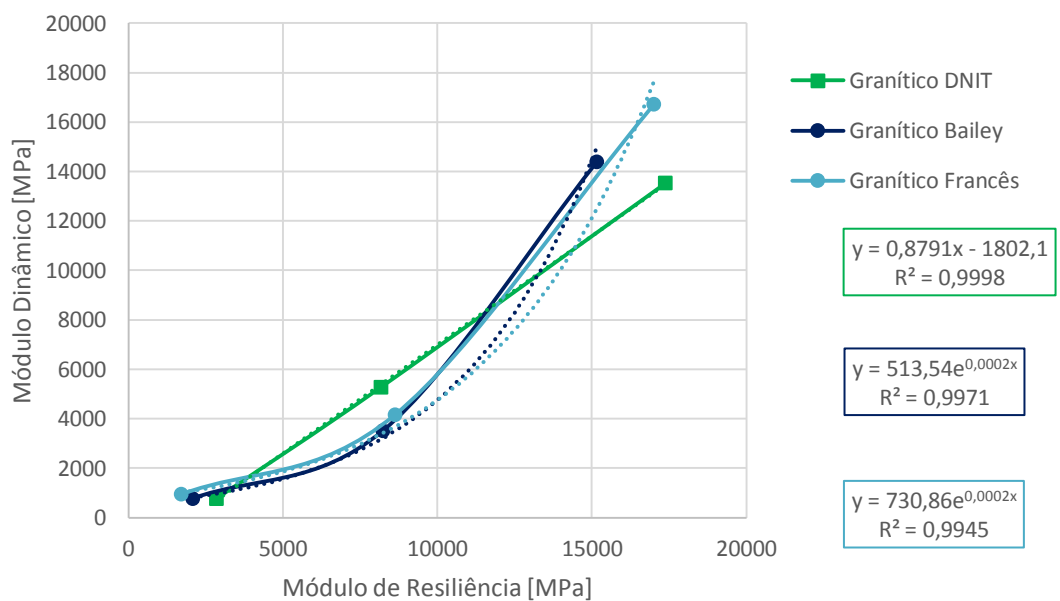
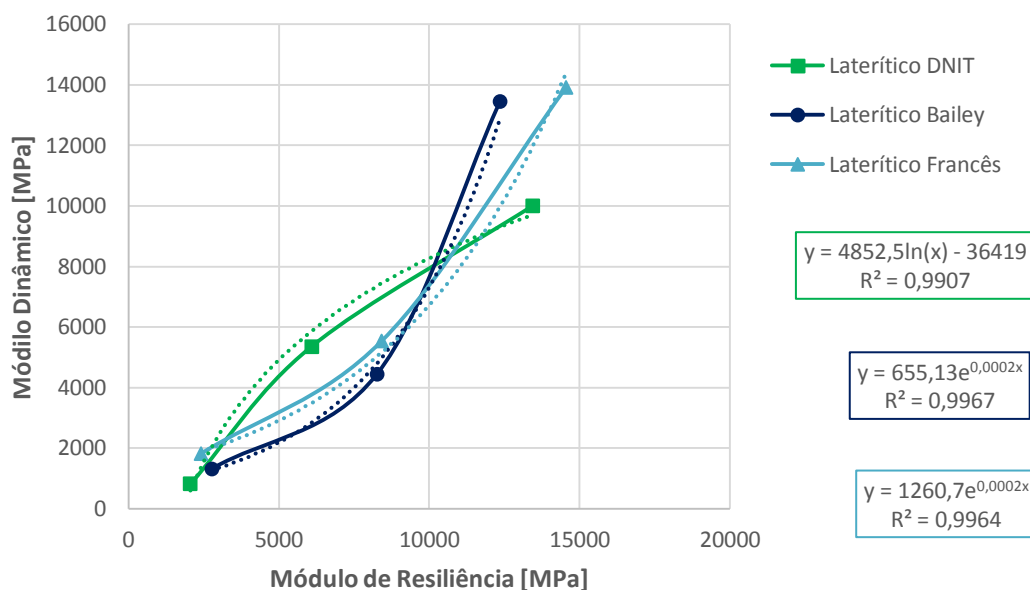


Figura 90 - Gráfico Módulo Dinâmico × Módulo de Resiliência para misturas utilizando agregados lateríticos.



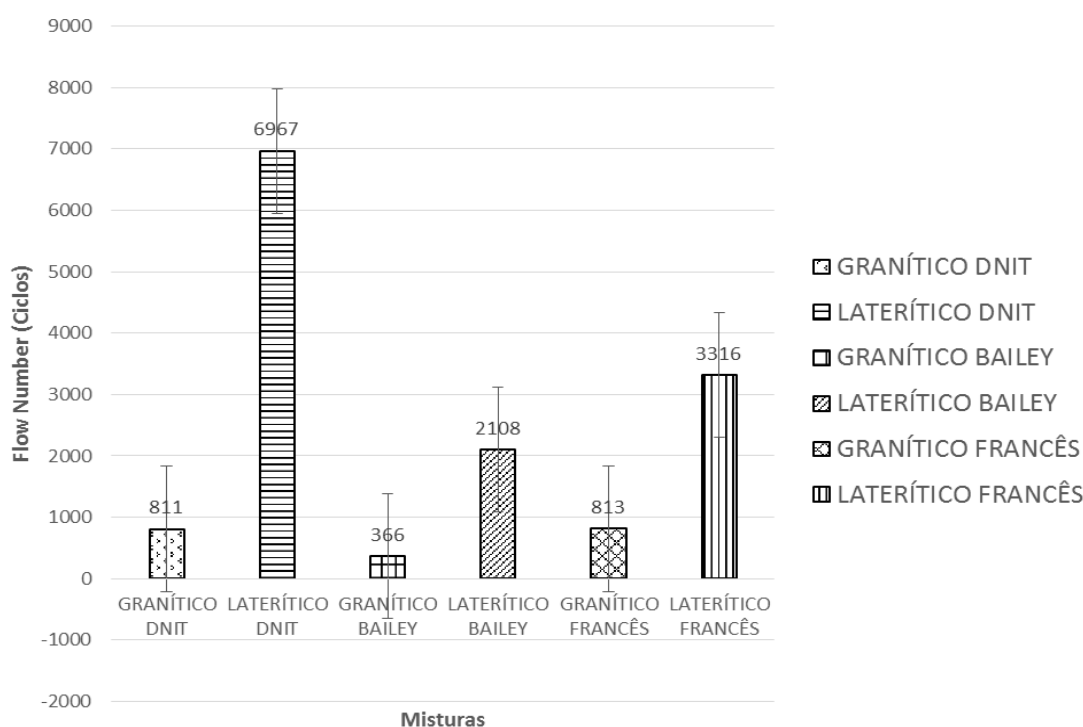
Observa-se que as misturas selecionadas pelo método DNIT apresentam comportamento distinto das demais. Para as que utilizaram agregado granítico a equação linear foi a que melhor representou a tendência dos pontos observados enquanto que para as que utilizaram agregados lateríticos a equação logarítmica foi a que apresentou melhor representatividade. As misturas selecionadas pelos métodos Bailey e Francês apresentaram tendência exponencial para ambos os tipos de agregados utilizados.

4.4.9 Flow Number (Resistência à Deformação Permanente)

Os resultados obtidos para os ensaios de *flow Number* realizados com as misturas da pesquisa estão ilustrados na Figura 91.

Observa-se que as misturas que utilizaram agregados lateríticos em sua composição apresentaram resultados superiores cerca de 88%, 83% e 75% para as misturas DNIT, Bailey e Francês respectivamente. Tais resultados indicam que as misturas lateríticas suportaram um maior número de ciclos de carregamento até atingir o ponto de transição da zona com taxa de deformação permanente constante para a zona de ruptura, indicando assim maior resistência à deformação permanente.

Figura 91 - Resultados do *Flow Number* para as misturas analisadas.



Barros (2017) explica que os agregados são responsáveis pelo desempenho das misturas frente às deformações permanentes e que fatores como granulometria e tamanho máximo nominal das partículas exercem influência direta neste parâmetro. Desse modo, o comportamento favorável das misturas utilizando agregados lateríticos explica-se pela maior presença de finos na curva da mistura o que torna a distribuição granulométrica mais contínua favorecendo o aumento da resistência à deformação permanente.

Segundo as recomendações de Nascimento (2008) as misturas asfálticas devem apresentar um valor de *flow number* mínimo de 300 ciclos para suportar tráfego médio ($>3 \times 10^6$; $\leq 1 \times 10^7$) e de 750 ciclos para suportar tráfego pesado ($>1 \times 10^7$; $\leq 3 \times 10^7$).

Da análise dos valores de referência propostos por Nascimento (2008) foi possível inferir que as misturas ensaiadas são poucos susceptíveis às deformações permanentes. Os resultados obtidos revelam que todas as misturas atendem ao critério para serem empregadas em tráfego pesado.

De acordo com Soares (2014) misturas com menor volume de vazios tendem a apresentar menores valores de taxa de deformação permanente devido ao maior contato entre as partículas. Assim, os elevados valores de FN obtidos para as misturas lateríticas explicam-se por este fator.

A obtenção de valores significativos de FN nas seis misturas ensaiadas confirma a proposição de que misturas de seleção granulométrica adequada atingem valores de resistência representativos. A *Federal Highway Administration (FHWA)* chega a fixar em até 80% o percentual de responsabilidade dos agregados para responderem na prevenção dos danos por deformação permanente, e os resultados obtidos para as misturas da pesquisa confirmam que, utilizando o mesmo ligante e os mesmos agregados, é possível modificar a resistência da mistura apenas trabalhando curvas distintas.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste capítulo estão apresentadas as conclusões obtidas a partir da realização desta pesquisa, bem como sugestões para realização de novas pesquisas envolvendo os mesmos objetos de estudo.

5.1 Considerações Finais

A análise dos resultados obtidos na pesquisa possibilitou concluir que:

- a avaliação das misturas a partir do método FAD apresentou resultados que puderam ser confirmados com a realização dos ensaios mecânicos para a maioria das misturas avaliadas; assim mostrou-se ser uma ferramenta útil para avaliar as curvas granulométricas de misturas asfálticas e julgar o seu comportamento frente aos esforços mecânicos;
- a seleção granulométrica dos agregados pelos métodos DNIT, Bailey e Francês permitiu compor misturas aplicáveis, uma vez que apresentaram resistência adequada às exigências normativas. Dentre as misturas avaliadas, a que apresentou melhor desempenho para a maioria dos ensaios realizados foi a que utilizou agregado granítico selecionada pelo método DNIT. Das misturas que utilizaram agregados lateríticos, a que apresentou melhor comportamento foi a selecionada pelo método Francês;
- ao avaliar os parâmetros físicos e morfológicos dos agregados verificou-se uma influência mais significativa para as características consideradas críticas, ou seja, características cujos parâmetros se afastam muito do preconizado pelas normas vigentes;
- a substituição do agregado granítico (convencionalmente utilizado) pelo agregado laterítico foi possível em todas as frações das misturas avaliadas, o que permitiu enquadrá-lo nas faixas granulométricas selecionadas;
- o tipo de agregado empregado, a sua granulometria e a quantidade de finos presente na faixa selecionada exerce interferência na seleção granulométrica

utilizada e no comportamento mecânico das misturas. Do mesmo modo, os resultados indicaram que a escolha de um método de seleção granulométrica influencia na qualidade das misturas bem como nas características de resistência.

Portanto, os resultados indicaram além da possibilidade de aplicação dos métodos de seleção granulométrica para escolha de misturas asfálticas com características de resistência distintas, a possibilidade de utilização do método FAD como procedimento de previsão do comportamento frente às deformações permanente e a inclusão do agregado laterítico como opção válida à substituição de agregados em misturas asfálticas. As análises indicaram a mistura selecionada pelo método DNIT utilizando agregado granítico, ou seja, mistura convencionalmente utilizada na região, como a de melhor desempenho geral.

5.2 Conclusões

Os agregados lateríticos caracterizados na pesquisa apresentaram, em alguns ensaios, resultados distintos dos propostos pelos limites citados pelos órgãos rodoviários brasileiros, essa discrepância pode ser explicada ao levar em conta que as normas brasileiras utilizam em sua maioria agregados graníticos como referência o que faz com que devido a sua origem e composição distinta, os agregados lateríticos apresentem valores que não se enquadram. Para caracterização adequada desse material seria necessária a verificação de valores limite mais apropriados às características inerentes a ele.

Desse modo, a caracterização física desses agregados não deve ser utilizada como única ferramenta de escolha para aplicação em misturas asfálticas; é importante que sejam realizados outros procedimentos e avaliações antes de classificar o material como impróprio.

Os resultados avaliados permitiram verificar que a aplicação do agregado laterítico em misturas asfálticas é possível e os ensaios revelaram que é possível obter resultados satisfatórios quanto a avaliação das propriedades mecânicas dessas. Tornando dessa forma as propriedades morfológicas fatores menos determinantes da qualidade e resistência das misturas.

Assim, verificado que as características morfológicas dos agregados influenciam nos resultados dos ensaios mecânicos, mas não são fatores determinantes; que a escolha de faixas granulométricas a partir de métodos de seleção adequados exerce influência nas características das misturas e permite a aplicação de agregados diversos e que as misturas que utilizaram agregados lateríticos apresentaram bom desempenho para os ensaios realizados, é possível incluir o agregado laterítico como uma opção viável a substituição dos agregados convencionalmente utilizados.

5.3 Sugestões para Pesquisas Futuras

Avaliados os resultados obtidos nesta pesquisa propõe-se as seguintes sugestões para pesquisas futuras:

- comparar os resultados obtidos com misturas semelhantes, utilizando ligante asfáltico modificado por polímero, a fim de verificar a influência do ligante na resistência das misturas;
- realização de estudos utilizando agregados lateríticos oriundos de outras regiões a fim de confirmar o comportamento encontrado;
- avaliar a influência na resistência, da quantidade de finos nas misturas asfálticas, utilizando agregados lateríticos;
- aumentar o número de amostras ensaiadas para MR e $|E^*|$ a fim de obter curvas características que possibilitem relacionar os dois parâmetros;
- realizar estudos utilizando outros tipos de agregados oriundos de regiões distintas;
- verificar a possibilidade de utilização de outros métodos de seleção granulométrica;
- execução de trechos experimentais,
- utilizando as misturas obtidas a partir dos estudos desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

AL ROUSAN, T. M. **Characterization of aggregate shape properties using a computer automated system**. Dissertation. Texas A&M University, 2004.

ALI, Y. IRFAN, M.; AHMED, S.; KHANZADA, S.; MAHMOOD, T. **Investigation of factors affecting dynamic modulus and phase angle of various asphalt concrete mixtures**. *Materials and Structures*, v. 49, p. 857–868, 2016.

ALVES, V.A.H.S. **Avaliação da resistência a degradação mecânica de agregados da região metropolitana do Rio de Janeiro por técnicas digitais de imagens**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Maio, 2014.

AMARAL, S. C. **Estudo de Misturas Laterita-asfalto da região metropolitana de Belém-PA para revestimento de pavimentos**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2004.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 304**: Uncompacted Void Content of Fine Aggregate. (As influenced by particle shape, surface texture, and grading). Estados Unidos, 2008.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 19**: Method of Test for Bulk Density ('Unit Weight') and Voids in Aggregate. Estados Unidos, 2014.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 305**: Determination of Draindown Characteristics in Uncompacted Asphalt Mixtures. Estados Unidos, 1997.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 283**: Resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage. Anexo de normas traduzidas – Rede Temática de Ligante asfáltico – PETROBRÁS, 2002.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO TP 62**: Determining modulus of hot mix asphalt (HMA). Estados Unidos, 2009.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO MP 8-02**: Stone Matrix Asphalt (SMA). Estados Unidos, 2001.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1252**: Standard Test Methods for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate (as Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading) (Withdrawn 2015). Estados Unidos, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 2872**: Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). Estados Unidos, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 4791**: Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate. Estados Unidos, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5821**: Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate. Estados Unidos, 2013.

AMU, O. O., BAMISAYE, O. F. and KOMOLAFE, I. A. **The suitability and Lime Stabilization Requirement of Some Lateritic Soil Samples as Pavement**. 2011.

ANITELLI, A. **Estudo do Dano Por Umidade de Misturas Asfálticas com Ligantes Asfálticos Convencional e Modificado com Polímero SBS**. 2013. 107 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

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

ASOCIACIÓN MERCOSUR NORMALIZACIÓN. **NM 30**: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro. 2001.

ASOCIACIÓN MERCOSUR NORMALIZACIÓN. **NM 52**: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9935**: Agregados – Terminologia. Rio de Janeiro – RJ, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15184**: Materiais betuminosos: determinação da viscosidade em temperatura elevada usando um viscosímetro rotacional. Rio de Janeiro-RJ, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16018**: Misturas asfálticas – Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PAVIMENTAÇÃO. (**ABPv**). Disponível em <<http://www.abpv.org.br/ABPv/>>. Acesso em 10 de dezembro de 2017.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **AFNOR NF P 98-251-1**. Essais Relatifs aux Chaussées - Préparation des Mélanges Hydrocarbonés. Essai de Duriez. [S.l.]. 1995.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **AFNOR NF P 98-260-2**: Essai de Module Complexe. [2006].

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **AFNOR NF P 98-261-1**: Essai de Fatigue. [2006].

BARRA, B. S. **Avaliação da Ação da água o Módulo Complexo e na Fadiga de Misturas Asfálticas Densas**. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 327. 2009.

BARROS, L. M. **Deformação permanente de misturas asfálticas: avaliação do desempenho pelo critério de *Flow Number* de misturas quentes e mornas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 2017.

BASTOS, J. B. S. **Considerações Sobre a Deformação Permanente de Pavimentos Asfálticos no Dimensionamento Mecânico – Empírico**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Ceará. Centro de Tecnologia. Programa de Pós Graduação em Engenharia de Transportes. Fortaleza. 2016.

BATHINA, M. **Quality analysis of the Aggregate Imaging System (AIMS) measurements**. Thesis of Master of Science. Texas A&M University. May, 2005.

BERNUCCI, L.L.B.; MOTTA, L.M.G; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica** - Formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS/ABEDA, 2010.

BESSA; I.S.; CASTELO BRANCO, V.T.F.; SOARES, J.B. **Avaliação do processo de produção de agregados por meio da utilização do processamento digital de imagens**. Associação de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET, 2011.

BESSA; I.S.; CASTELO BRANCO, V.T.F.; SOARES, J.B. **Caracterização de agregados convencionais e alternativos utilizando técnicas de processamento digital de imagens**. Monografia CBUT, 2009.

BESSA; I.S.; CASTELO BRANCO, V.T.F.; SOARES, J.B. **Evaluation of polishing and degradation resistance of natural aggregates and steel slag using AIMS**. 2nd Symposium on Asphalt Pavements and Environment, Fortaleza, 2012.

BESSA; I.S.; CASTELO BRANCO, V.T.F.; SOARES, J.B. **Evaluation of polishing and degradation resistance of natural aggregates and steel slag using AIMS**. 2nd Symposium on Asphalt Pavements and Environment, Fortaleza, 2012.

BORBOREMA, Gilberto Albuquerque. **Concreto Asfáltico Usinado a Quente Dosagem/Produção/Controle**. 4º Encontro Técnico DER/PR. 2007.

BORRÉ, G.; DELLA FLORA, C.S.; BERNARDI, C. Goecks, P.; WAYHS, C. A. S P.; RUVEN, C. A.; BASTOS, C. A. B. **Estudo de Solo Argiloso Laterítico do Noroeste do Rio Grande do Sul para Uso em Pavimentos Econômicos - Misturas de Solo Laterítico – Brita**. Reunião Anual de Pavimentação, Gramado, RS, 2013.

BROSSEAUD, Y. **O método francês para dosagem de misturas asfálticas: abordagem, métodos de ensaio, confiabilidade e validade**. Trabalhos técnicos. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro do Petróleo. In: Encontro do Asfalto, 16., Rio de Janeiro, 2002.

BUCHANAN, M.S. **Evaluation of the effect of flat and elongated particles on the performance of hot mix asphalt mixtures**. Report 00-03, National Center for Asphalt Technology (NCAT). Auburn, USA, 2000.

CADERNO DE ENCARGOS TIPO OBRA. **NP 14.03: Pavimentação, Características dos Materiais**. Estradas de Portugal, S.A. 2014.

CHAGAS FILHO, Milton Bezerra. **Estudo de Agregados Lateríticos para Utilização em Concretos Estruturais**. Tese de Doutorado: Pós-graduação em Engenharia de Processos. Campina Grande, PB, CCT/UFCG. 2005.

CHAGAS, R. M. P. **Estudo do Concreto Laterítico Dosado com Aditivo Plastificante à Base de Lignosulfonato**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. 2011.

CONSELHO NACIONAL DE TRANSPORTES. **Pesquisa CNT de rodovias 2017:** relatório gerencial. – Brasília: CNT : SEST : SENAT, 2017.

COSTA, L. F. ; LUCENA, Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes ; PATRICIO, J. D. ; MARINHO, P. G. T. . **Avaliação do uso de agregados lateríticos em misturas asfálticas.** In: 45ª RAPv / 19ª ENACOR, 2016, Brasília. Trabalhos Poster, 2016.

COUTINHO, Joana de Sousa – **Durabilidade, Ataque por Sulfatos.** Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP. 2001.

CUNHA, M. B. (2004). **Avaliação do Método Bailey de Seleção Granulométrica de Agregados para Misturas Asfálticas.** Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

CUNHA, M. B.; GOUVEIA, L. T.; MOTTA, L. M. G.; FERNANDES JR., J. L.. **Influência dos Agregados sobre Propriedades Mecânicas e Volumétricas de Misturas Asfálticas: Análise do Método Bailey.** In: XVII ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2004, Florianópolis-SC. Anais do XVII ANPET - Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2004.

DAIBERT, R. F. **Influência da Temperatura e Velocidade de Operação no Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos de Corredores de Ônibus.** Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2015.

DE CEZARO JUNIOR, T. **Estudo das Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas Convencionais e Modificadas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 2008.

DENNEMAN, E.; NKGAPELE, M.; BOATENG, J. A.; MAINA, J. W. **Transfer of high modulus asphalt technology to South Africa.** 10th Conference on asphalt pavements for Southern Africa, 2011.

DENNEMAN, E; VERHAEGHE, B. M. J. A. e SADZIK, E. S. **Aggregate packing characteristics of good and poor performing asphalt mixes.** Proceedings of the 26th Southern African Transport Conference. 2007.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT - ME 083: Agregados – Análise granulométrica – Método de ensaio.** Norma rodoviária. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.
DNIT - ME 054: Equivalente de areia. Norma rodoviária. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.
DNIT - ME 086: Agregado – Determinação do índice de forma. Norma rodoviária. Rio de Janeiro – RJ, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.
DNIT - ME 031: Pavimentos Flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de Serviço. Norma rodoviária. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.
DNIT - ME 035: Agregados – Determinação da Abrasão Los Angeles. Norma rodoviária. Rio de Janeiro – RJ, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.
DNIT - ME 043: Misturas betuminosas a quente: Ensaio Marshall: Método de ensaio. Norma rodoviária. Rio de Janeiro, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.
DNIT - ME 078: Agregado graúdo – Adesividade a ligante betuminoso. Norma rodoviária. Rio de Janeiro – RJ, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.
DNIT - ME 089: Agregados – Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. Norma rodoviária. Rio de Janeiro – RJ, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.
DNIT - ME 155: Material asfáltico – Determinação da penetração – Método de ensaio. Norma rodoviária. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.
DNIT - ME 131: Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola Método de ensaio. Norma rodoviária. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.
DNIT - ME 383: Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – ensaio Cântabro: Método de ensaio. Norma rodoviária. Rio de Janeiro, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT - ME 136:** Pavimentação asfáltica – misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral: Método de ensaio. Norma rodoviária. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT - PRO 195:** Agregados – determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. Norma rodoviária. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT- PRO 199:** Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório. Norma rodoviária. Rio de Janeiro, 1996.

DUTRA, S.V.M. **Estado da Arte Sobre a Utilização de Solos Lateríticos em Pavimentos Rodoviários.** Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia – Universidade do Porto. Porto. 2014.

FERREIRA, J. L. S. **Novas Diretrizes para Seleção Granulométrica de Misturas Asfálticas Densas com Foco na Deformação Permanente.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes. Fortaleza. 2017.

FERREIRA, Jorge Luis Santos; BASTOS, Jusceline Batista dos Santos e SOARES, Jorge Barbosa. **Validação da metodologia de faixa de agregados dominantes para avaliação e especificação da granulometria de misturas asfálticas densas.** In: XXIX ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2015, Ouro Preto – MG. Anais do XXIX ANPET - Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2015.

FHWA. **Superpave Mixture Design Guide.** Federal Highway Administration. Washington D.C., 2013.

GOUVEIA, B. C. S.; BASTOS, J. B. S.; SOARES, J. B. **Contribuições quanto à resistência à deformação permanente de misturas asfálticas.** In: 49º Reunião Anual de Pavimentação, Brasília, 2016.

GOUVEIA, L.T.; FERNANDES JR., J.L. **Considerações a respeito das propriedades de consenso do Superpave para agregados de misturas asfálticas.** Anais do Congresso ANPET. 2006.

GREENE, J.; S. CHUN e B. CHOUBANE. **Enhanced gradation guidelines to improve asphalt mixture performance**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. V. 2256, p. 3-10. 2014.

KANDHAL, P.S.; PARKER JR., F. “NCHRP Report 405: **Aggregate tests related to asphalt concrete pavement performance in pavements**. Transportation Research Board. Washington, D.C., 1998.

KIM, S. **Identification and assessment of the dominant aggregate size range (DASR) of asphalt mixture**. Dissertation (Doctor of Philosophy). University of Florida, Gainesville. 2006.

KIM, S.; R. ROQUE; B. BIRGISSON e A. GUARIN. **Porosity of the dominant aggregate size range to evaluate coarse aggregate structure of asphalt mixtures**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 21(1), p. 32– 39. 2009.

KIM, Y.R.; SOUZA, L.T. **Effects of aggregate angularity on mix design characteristics and pavement performance**. Report on research No. MPM-10. Mid-America Transportation Center and University of Nebraska-Lincoln. December, 2009.

LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES (LCPC). **Manuel LPC d’aide à la formulation**. Paris: [s.n.], 2007.

LAMBE, T.W. e WHITMAN, R.V. **Soil Mechanics**. John Wiley & Sons. (1969).

LEANDRO, Rodrigo Pires – **Avaliação do comportamento mecânico de corpos de prova de misturas asfálticas a quente resultantes de diferentes métodos de compactação** -- versão corr. – USP – São Paulo, 2016.

MAGALHÃES, S.T. **Misturas Asfálticas de Módulo Elevado para Pavimentos de Alto Desempenho**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. 184p. 2004.

MAHMOUD, E. **Development of experimental methods for the evaluation of aggregate resistance to polishing, abrasion, and breakage**. Thesis for the degree of Master of Science, Texas A&M University. December, 2005.

MAHMOUD, E.; GATES, L.; MASAD, E.; ERDOGAN, S.; GARBOCZI, E. **Comprehensive evaluation of AIMS texture, angularity, and dimension measurements**. Journal of Materials in Civil Engineering. April, 2010.

MARTINEZ, G. **Estudo do Comportamento Mecânico de Solos Lateríticos da Formação Barreiras**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre. 2003.

MASAD, E.; AL-ROUSAN, T.; BUTTON, J.; LITTLE, D.; TUTUMLUER, E. **Test methods for characterizing aggregate shape, texture, and angularity**. Report NCHRP-555, National Cooperative Highway Research Program. National Research Council. Washington, D.C., USA, 2007.

MASAD, E.; OLCOTT, D.; WHITE, T.; TASHMAN, L., **Correlation of fine aggregate imaging shape indices with asphalt mixture performance**. Transportation Research Record 1757, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C., pp.148 - 156, 2001.

MASAD, E.; REZAEI, A.; CHOWDHURY, A.; HARRIS, P. **Predicting asphalt mixture skid resistance based on aggregate characteristics**. Texas Department of Transportation, Texas A&M University. August, 2009.

MASAD, E.A. **Aggregate Imaging System (AIMS) basics and applications**. Texas Department of Transportation and the Federal Highway Administration. October, 2005.

MASAD, E.A.; LUCE, A.; MAHMOUD, E. **Implementation of AIMS in measuring aggregate resistance to polishing, abrasion and breakage**. Texas Transportation Institute, Texas A&M University. December, 2006.

MATTOS, J.R.G. **Avaliação da aderência pneu-pavimento e tendências de desempenho para a rodovia BR-290/RS**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Agosto, 2009.

MENDES, Larissa de Oliveira. **A utilização do método Bailey para a seleção de agregados em misturas asfálticas**. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2011.

MERIGHI, C. F. **Estudo do comportamento de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimento com adição de borracha moída de pneu**. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, Brasil. 2015.

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

MORILHA JUNIOR, A. **Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas.** Dissertação de mestrado, Programa de Engenharia Civil, UFSC, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 165f, 2004.

MOTTA, L. M. G., LEITE, L. F. **Efeito do filler nas características mecânicas das misturas asfálticas.** In: Congresso Pan-americano de Engenharia de Trânsito e Transporte – ANPET. Gramado, Rio Grande do Sul. 2000.

MOTTA, L. M. G., MEDINA, J., CRUZ, A. M. **Aspectos do Comportamento das Misturas Asfálticas.** In: CURSO RESILIÊNCIA E FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS.1993. Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro, 1993.

NASCIMENTO, L. A. H. **Nova Abordagem da Dosagem de Misturas Asfálticas Densas com Uso do Compactador Giratório e Foco na Deformação Permanente.** 204p. Dissertação (Mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil. Rio de Janeiro – 2008.

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

ONOFRE, F. C. **Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas produzidas com ligantes asfálticos modificados por ácido polifosfórico e aditivos poliméricos, enfatizando a resistência à deformação permanente.** 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. 2012.

OTTO, G. G. **Misturas Asfálticas Mornas – Verificação da Fadiga e do Módulo Complexo.** 164f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro Tecnológico. Universidade Federal de Santa Catarina. 2009.

P. Autret, **Latérites et graveleux latéritiques.** ISTED - LCPC, 1983.

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

PEREIRA, Mariana Minitti Leite – **Estudo de mistura asfáltica de módulo elevado para camadas de base de pavimento / M.M.L. Pereira.** -- ed.rev. – USP - São Paulo, 2012.

PÉREZ, Y. A. G. **Estudo da Aplicabilidade do Ultra-Som na Avaliação das Propriedades do Concreto Asfáltico**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 182. 2009.

PINE INSTRUMENT. **Aggregate Image Measurement System (AIMS)**. Disponível em <<http://www.pineinst.com/test/products/afa2.html>>. Acesso em 19 de novembro de 2017.

PORTAL DE TECNOLOGIA. **Estudos de Solos Tropicais**. Disponível em <<http://www.portaldetecnologia.com.br>>. Acesso em 15 de julho de 2017.

QUIÑONES, F.S. **Aplicabilidade de resíduos reciclados da construção e demolição como agregados em misturas asfálticas**. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-099/14, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 168 p. 2014.

QUINTERO, Carlos Fernando Quintero **Estudo de misturas asfálticas com ligantes de consistência elevada: formulação e comportamento mecânico**. Dissertação– UFSC Florianópolis, SC, 2011.

ROBERTS, F.L.; KANDHAL, P.S; BROWN, E.R; LEE, D.Y; KENNEDY, T.W. **Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction**. Report NCHRP-539, National Asphalt Pavement Association Research and Education Foundation. Second Edition. Maryland, USA, 1996.

RODRIGUES, A.C. **Avaliação da influência da granulometria de misturas asfálticas na aderência pneu-pavimento**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Ceará. Novembro, 2013.

RODRIGUES, A.C.; SOARES, J.B.; BARROSO, S.H.A. **Avaliação da influência da granulometria de misturas asfálticas na aderência pneu-pavimento**. Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes. Novembro, 2014.

ROQUE, R.; M. BEKOE; M. ISOLA; J. ZUO E G. LOPE. **Validation and refinement of mixture volumetric material properties identified in Superpave monitoring Project II: phase II**. Gainesville, Flórida. 2015.

SANTANA, H. e GONTIJO, P.R.A. **Os Materiais Lateríticos na Pavimentação de Baixo Custo no Brasil**. Associação Brasileira de Pavimentação - ABPv, 22ª Reunião Anual de Pavimentação, Maceió, Alagoas, Brasil. 1987.

SAUTEREY, R. *et al.* **Les enrobés bitumineux**. Paris: Revue générale des routes et de l'aménagement - RGRA, v. 1, 2001. 229 p.

SILVA, Suyanne Costa; BASTOS, Jusceline Batista dos Santos e SOARES, Jorge Barbosa. **O efeito da seleção granulométrica na resistência à deformação permanente de misturas asfálticas**. In: XXIX ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. Anais do XXIX ANPET - Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, Ouro Preto – MG, 2015.

SISTEMA NACIONAL DE VIAÇÃO. **SNV (2016)**. Disponível em <<http://www.transportes.gov.br/conteudo/63-bit/3601-bit-snv.html>>. Acesso em 20 de dezembro de 2017.

SOARES, J. S. **Investigação da Relação entre Parâmetros da Compactação e de Deformação Permanente em Misturas Asfálticas Densas**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Engenharia de Transportes. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos. 2014.

SOUZA, J. L. F. **Estudo de Durabilidade de Concretos e Argamassas Através de RAA em Agregados Convencionais da Região de Campina Grande e Alternativos em Concreções Lateríticas Sapé-PB e Jacumã- PB**. Pós-graduação em Geotecnia CTRN/UFCG, Dissertação de mestrado. Campina Grande, PB. 2007.

SOUZA, L.T.S.; KIM, Y.R.; SOUZA, F.V.; CASTRO, L.S. **Experimental testing and finiteelement modeling to evaluate the effects of aggregate angularity on bituminous mixture performance**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 24 (3), pp. 249-258. 2012.

SUKHWANI, R.; LITTLE, D.N.; MASAD, E. **Sensitivity of HMA performance to aggregate shape measured using conventional and image analysis methods**. TTI Report 0-1707-5, Texas Transportation Institute, College Station, TX, 2006.

TAVARES, Diogo Santos. **Avaliação Laboratorial de Mistura Asfáltica do Tipo SMA com Agregado Siderúrgico**. - Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2012.

TRIGO, A. P. M. **Estudo da dopagem de agregados para finalidade de uso em concretos estruturais**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2012.

VAVRIK, W. R. **Asphalt mixture design concepts to develop aggregate interlock**. Dissertation (Doctor of Philosophy). University of Illinois. Champaign, Illinois, EUA. 2000.

VAVRIK, W. R.; HUBER, G.; PINE, W. *et al.* **Bailey Method for Gradation Selection in HMA Mixture Design**. Transportation Research Board: Transportation Research Circular Number E-C044, Washington, D. C., EUA. Outubro. 2002.

VAVRIK, W. R.; W. J. Pine; G. A. Huber, S. H. Carpenter e R. Bailey. **The Bailey Method of Gradation Evaluation: The Influence of Aggregate Gradation and Packing Characteristics on Voids in Mineral Aggregate**. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 70, 2001.

VILLELA, A.R.A.; BERNUCCI, L.L.B.; DIAS, C.R.C., SUSUKI, C.Y.; ESCUDEIRO, M.S. **Camada de base asfáltica de módulo elevado para restauração de rodovias de tráfego pesado: a primeira experiência no Brasil em escala real**. 7ª Exposição Internacional de Produtos para Rodovias, BRASVIAS, 2011.

VILLELA, Assis Rodrigues Abbud. **Estudo de Camada de Base Asfáltica de Módulo Elevado para Restauração de Rodovias de Tráfego Muito Pesado**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, SP, 2012.

WHITE, T.D.; HADDOCK, J.E.; RISMANJOTO, E. **NCHRP Report 557: Aggregate tests for hot-mix asphalt mixtures used in pavements**. NCHRP Report 557. Transportation Research Board. Washington, D.C., 2006.

ANEXOS

(Dados da dosagem das Misturas)

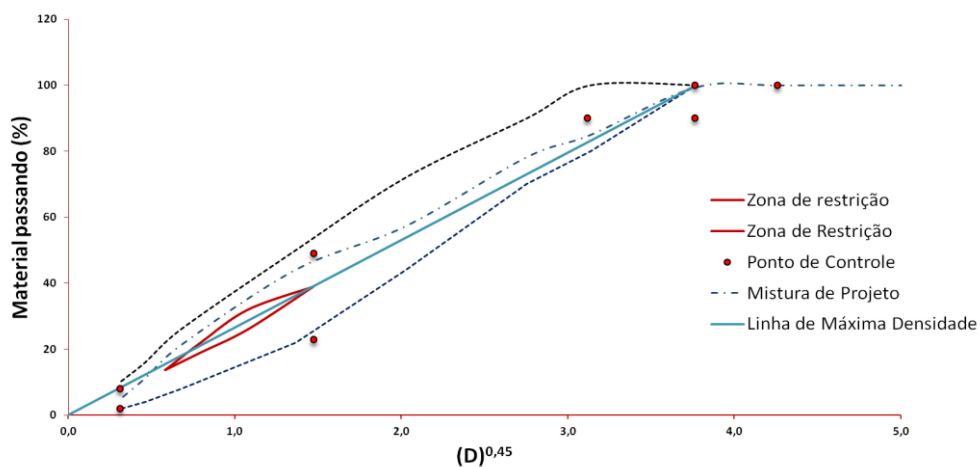
Dosagem das Misturas

Nos anexos A1 a A12 estão ilustrados os procedimentos da dosagem das misturas avaliadas.

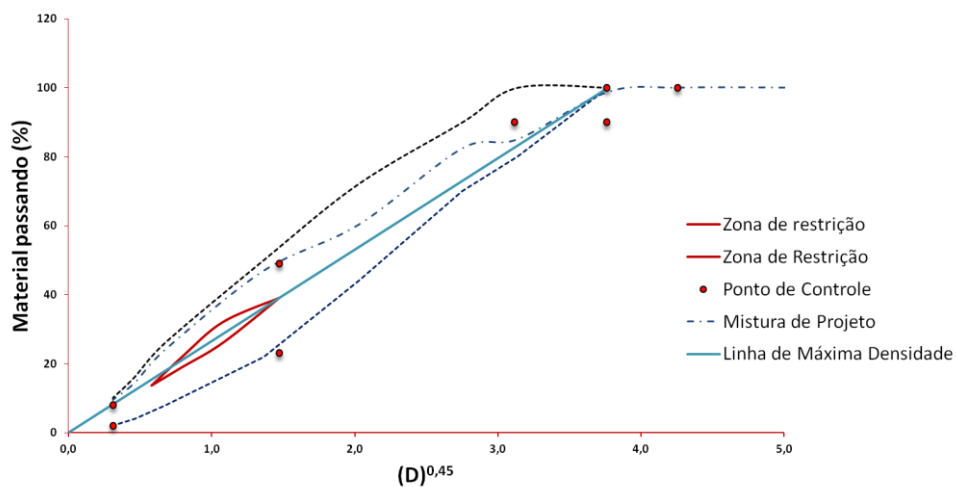
Passo 1:

Optou-se por enquadrar as misturas DNIT e Francês na faixa intermediária da curva *fuller*, enquanto que as misturas Bailey foram utilizadas com as porcentagens definidas pelo método.

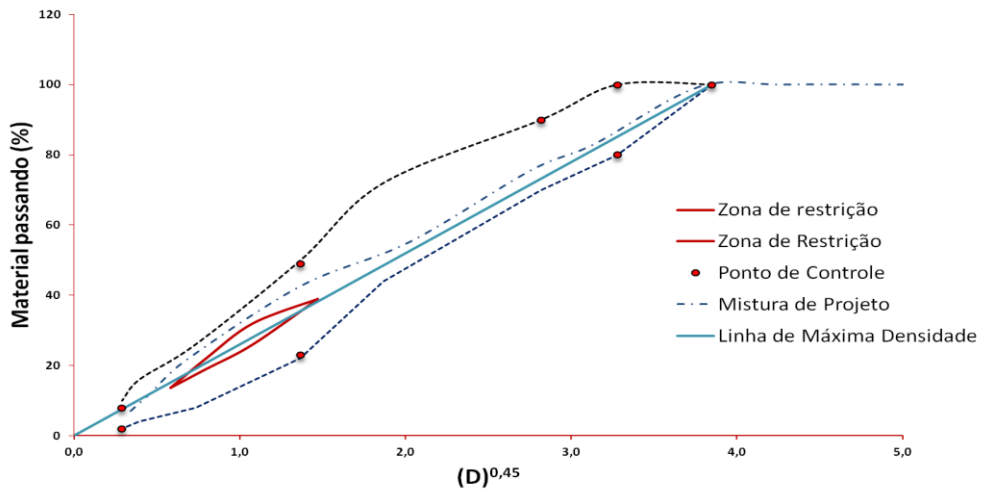
A1 - Curva fuller Método DNIT - Agregado Granítico



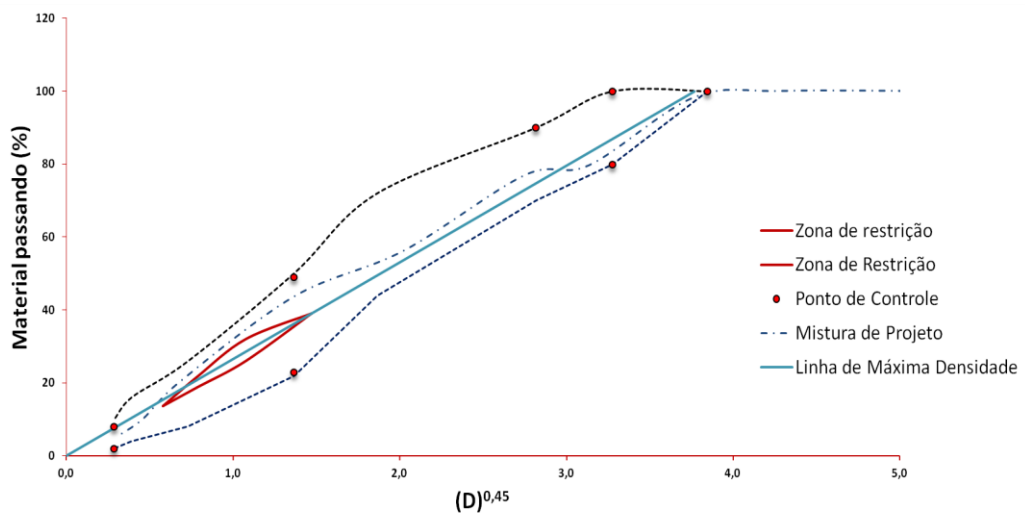
A2 - Curva fuller Método DNIT - Agregado Laterítico



A3 - Curva fuller Método Francês - Agregado Granítico



A4 - Curva fuller Método Francês - Agregado Laterítico



A5 - Definição da Mistura pelo Método Bailey – Agregado Granítico.

Método Bailey						
Classe do Material	Agregado Graúdo		Classe do Material	Agregado Miúdo		Filler
	Brita 19	Brita 9.5		Pó de Pedra	Areia	Cal
Densidade escolhida de AG pela % de densidade solta			Valor escolhido	Especificação	Passante na #200	
Porcentagem escolhida passando na #200			98	95-105	100	
			3,8	3,5-6,0		
Mistura de agregados graúdos por volume			Mistura dos agregados miúdos por volume			
Contribuição	53	47	Contribuição	55	45	
Soma da Contribuição (Deve ser igual a 100)	100		Soma da Contribuição (Deve ser igual a 100)	100		
Massa Específica Combinada de todos os agregados (kg/m³)	2320,6		Volume AG (%)	51,5		
			Volume AF (%)	48,5		
Peneiras (mm)			Peneiras (mm)			Mistura Calculada
19,00	95,03	100,00	19,00	100,00	100,00	96,6
12,70	36,10	100,00	12,70	100,00	99,66	77,2
9,50	3,36	93,72	9,50	100,00	99,57	64,1
4,75	0,14	31,46	4,75	99,50	96,28	39,3
2,36	0,13	1,59	2,36	86,55	89,52	25,2
1,18	0,12	0,84	1,18	64,62	74,82	19,7
0,60	0,12	0,78	0,60	47,69	43,28	13,1
0,30	0,12	0,73	0,30	34,67	12,29	7,3
0,15	0,09	0,66	0,15	15,72	1,54	2,9
0,075	0,03	0,37	0,075	10,79	0,63	1,9
Massa Específica Solta (kg/m³)	1480,00	1450,00	-	-		
Massa Específica Compacta (kg/m³)	1540,00	1480,00	1910,00	1720,00		
Massa específica(g/cm³)	2,846	2,722	2,516	2,475		
Massa Específica Aparente (g/cm³)	2,811	2,787	2,508	2,456		
Absorção (%)	0,44	0,85	0,30	0,16		
Massa Específica Escolhida	1450,4	1421,0	1910,0	1720,0		
Contribuição	768,7	667,9	509,0	375,0		
Vazios	26,0	22,5	-	-		
Massa Específica da Mistura (kg/m³)	2320,6					
Porcentagem pelo Peso (%)	33,1	28,8	21,9	16,2		
Passante na PCP para AG	0,1	31,5	Retido na PCP para AF	0,5	3,7	
Porcentagem de Agregado Fino no AG	0,05	9,06	Porcentagem de Agregado Graúdo no AF	0,11	0,60	
	9,10			0,71		
Ajuste	32,79	37,50	16,80	12,90		
Passante na #200	0,01	0,14	1,81	0,08		
Porcentagem de Material fino	1,76					
Porcentagem de final de agregado fino	-	-	15,81	12,14		
Porcentagem Final (%)	32,8	37,5	15,8	12,1	1,8	
			Soma da Porcentagem Final (Deve ser igual a 100)	100,00		
Proporção de AG	0,69	0,60-0,75	PCP	4,75		
Proporção de GAF	0,50	0,35-0,50	PCS	1,18		
Proporção de FAF	0,37	0,35-0,50	PCT	0,3		
			PM	9,5		

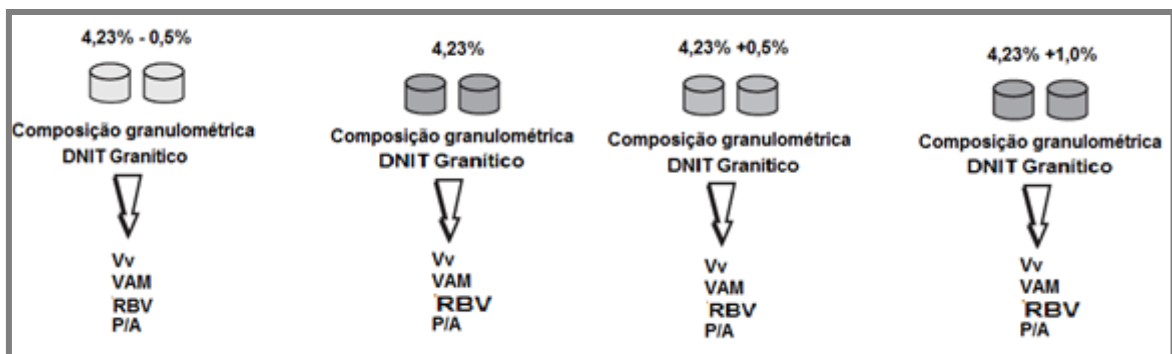
A6 - Definição da Mistura pelo Método Bailey – Agregado Laterítico.

Método Bailey						
Classe do Material	Agregado Graúdo		Classe do Material	Agregado Miúdo		Filler
	Brita 19	Brita 9.5		Pó de Pedra	Areia	Cal
Densidade escolhida de AG pela % de densidade solta			Valor escolhido	Especificação	Passante na #200	
Porcetagem escolhida passando na #200			105	95-105	100	
			4	3,5-6,0		
Mistura de agregados graúdos por volume			Mistura dos agregados miúdos por volume			
Contribuição	54	46	Contribuição	0	100	
Soma da Contribuição (Deve ser igual a 100)	100		Soma da Contribuição (Deve ser igual a 100)	100		
Massa Específica Combinada de todos os agregados (kg/m³)	2455,6		Volume AG (%)	55,3		
			Volume AF (%)	44,7		
Peneiras (mm)			Peneiras (mm)		Mistura Calculada	
19,00	96,05	100,00	19,00	100,00	96,2	
12,70	32,45	100,00	12,70	99,66	73,3	
9,50	4,39	98,05	9,50	99,57	62,2	
4,75	1,50	47,30	4,75	96,28	36,6	
2,36	1,40	31,79	2,36	89,52	28,2	
1,18	1,36	25,95	1,18	74,82	23,4	
0,60	1,28	18,73	0,60	43,28	15,5	
0,30	1,12	13,21	0,30	12,29	8,4	
0,15	0,81	5,35	0,15	1,54	3,1	
0,075	0,52	2,72	0,075	0,63	1,6	
Massa Específica Solta (kg/m³)	1560,00	1660,00	-	-		
Massa Específica Compacta (kg/m³)	1660,00	1760,00	0,00	1720,00		
Massa específica(g/cm³)	3,012	3,095	2,516	2,475		
Massa Específica Aparente (g/cm³)	2,600	2,634	2,508	2,456		
Absorção (%)	5,26	5,67	0,30	0,16		
Massa Específica Escolhida	1638,0	1743,0	0,0	1720,0		
Contribuição	884,5	801,8	0,0	769,3		
Vazios	24,6	20,1	-	-		
Massa Específica da Mistura (kg/m³)	2455,6					
Porcetagem pelo Peso (%)	36,0	32,7	0,0	31,3		
Passante na PCP para AG	1,5	47,3	Retido na PCP para AF	100,0	3,7	
Porcetagem de Agregado Fino no A	0,54	15,44	Porcetagem de Agregado Graúdo n	0,00	1,16	
	15,98			1,16		
Ajuste	35,95	47,54		0,00	16,51	
Passante na #200	0,19	1,29		0,00	0,10	
Porcetagem de Material fino	2,41					
Porcetagem de final de agregado fino	-	-		0,00	14,10	
Porcetagem Final (%)	36,0	47,5	0,0	14,1	2,4	
			Soma da Porcetagem Final (Deve ser igual a 100)	100,00		
Proporção de AG	0,68	0,60-0,75	PCP	4,75		
Proporção de GAF	0,64	0,35-0,50	PCS	1,18		
Proporção de FAF	0,36	0,35-0,50	PCT	0,3		
			PM	9,5		

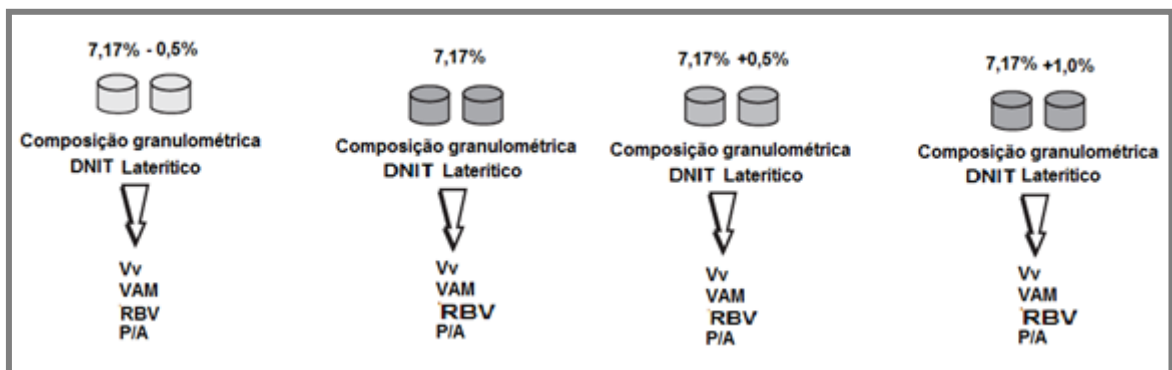
Passo 2:

Para conhecer qual teor de ligante ótimo para cada mistura, foram testados o teor inicial calculado mais três teores: $\pm 0,5\%$ e $+1\%$. Para cada teor foram feitos dois corpos de prova e deles foram obtidos os parâmetros volumétricos (Volume de Vazios [Vv], Vazios no Agregado Mineral [VAM] e Relação Betume Vazios [RBV]), além dos requisitos volumétricos verificou-se também a proporção Pó/Asfalto [P/A], que corresponde à razão entre o teor de material passante na peneira N° 200 e o teor de ligante, parâmetro que deve estar entre 0,6 e 1,2.

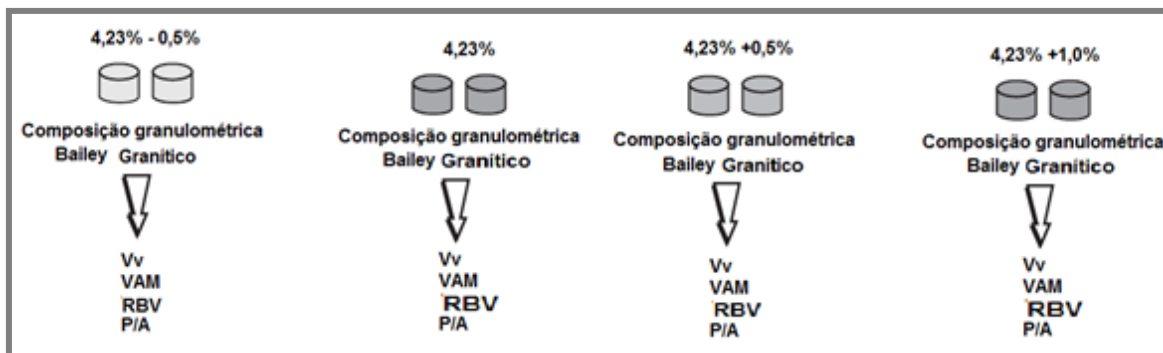
A7 - Representação esquemática dos grupos de corpos de prova da seleção granulométrica pelo método do DNIT utilizando agregados graníticos, variando o teor de ligante.



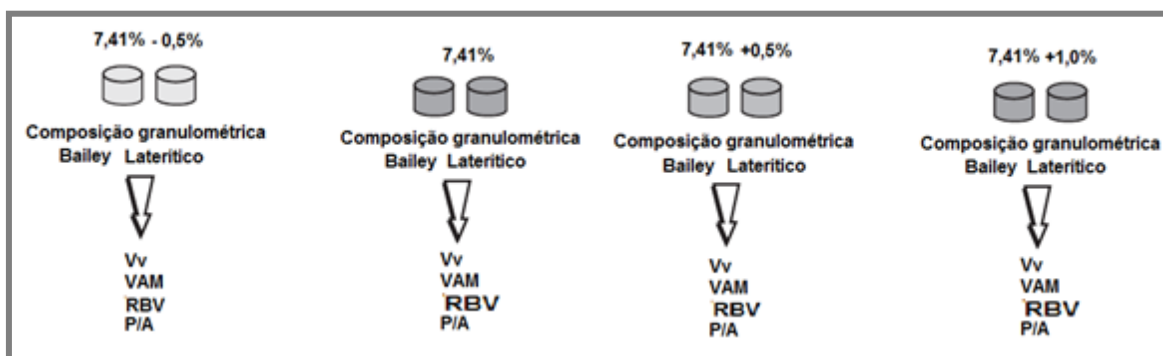
A8 - Representação esquemática dos grupos de corpos de prova da seleção granulométrica pelo método do DNIT utilizando agregados lateríticos, variando o teor de ligante.



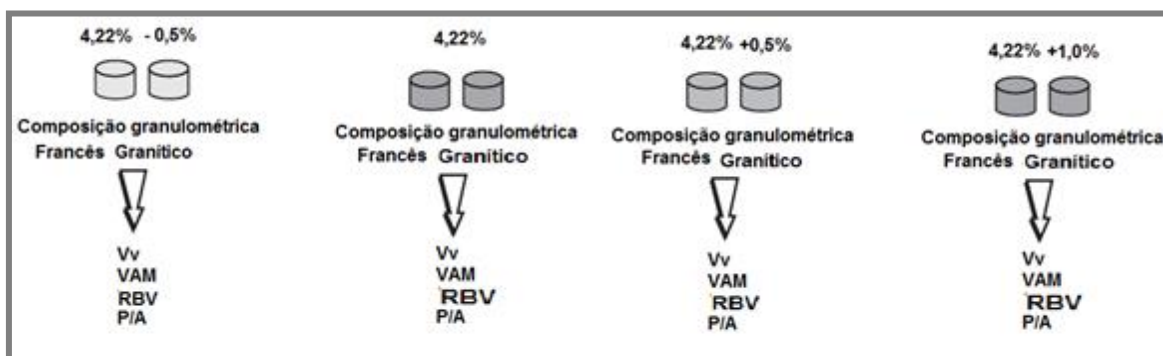
A9 - Representação esquemática dos grupos de corpos de prova da seleção granulométrica pelo método Bailey utilizando agregados graníticos, variando o teor de ligante.



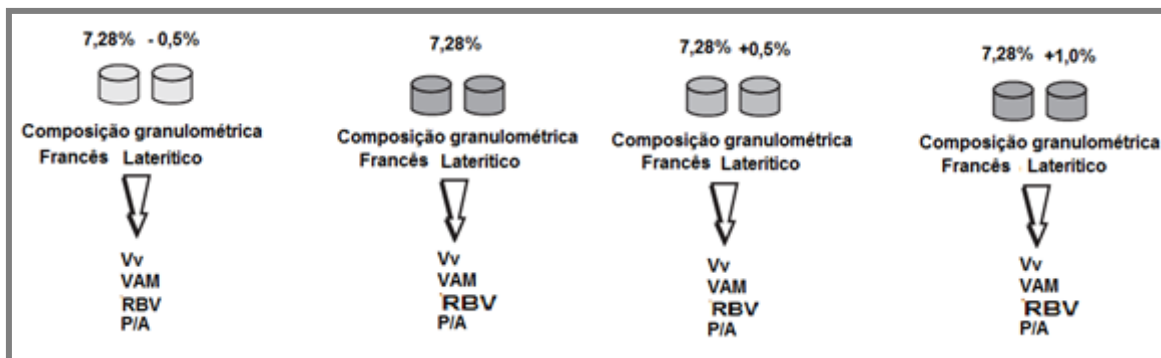
A10 - Representação esquemática dos grupos de corpos de prova da seleção granulométrica pelo método Bailey utilizando agregados lateríticos, variando o teor de ligante.



A11 - Representação esquemática dos grupos de corpos de prova da seleção granulométrica pelo método Francês utilizando agregados graníticos, variando o teor de ligante.



A12 - Representação esquemática dos grupos de corpos de prova da seleção granulométrica pelo método Francês utilizando agregados lateríticos, variando o teor de ligante.



Passo 3:

Após a realização dos testes para obtenção dos teores de ligante ótimo foi possível traçar os gráficos que relacionam teor de ligante e volume de vazios e a partir deles determinou-se o teor ótimo de para cada mistura avaliada.