

**MINISTÉRIO DA DEFESA  
EXÉRCITO BRASILEIRO  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA  
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES**

**MÁRCIO LEANDRO ALVES DE ARÊDES**

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS  
UTILIZANDO RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DO MINÉRIO DE FERRO**

**Rio de Janeiro  
2016**

**INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**

**MÁRCIO LEANDRO ALVES DE ARÊDES**

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS  
ASFÁLTICAS UTILIZANDO RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DO  
MINÉRIO DE FERRO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Transportes do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia de Transportes.

Orientador: Maj Antônio Carlos Rodrigues Guimarães – D.Sc.

**Rio de Janeiro**

**2016**

c2016

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmар ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

629.04	Arêdes, Márcio Leandro Alves de
A678a	Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas utilizando resíduo do beneficiamento do minério de ferro / Márcio Leandro Alves de Arêdes; orientado por Antônio Carlos Rodrigues Guimarães – Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2016.  148p.: il.  Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2016.  1. Curso de Engenharia de Transportes – teses e dissertações. 2. Pavimento. 3. Mineração . 4. Resíduo de minério de ferro. 5. Comportamento mecânico. 6. Análise de custo. I. Guimarães, Antônio Carlos Rodrigues. II. Título. III. Instituto Militar de Engenharia.

**INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**

**Maj MÁRCIO LEANDRO ALVES DE ARÊDES**

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS  
ASFÁLTICAS UTILIZANDO RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DO  
MINÉRIO DE FERRO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Transportes do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia de Transportes.

Orientador: Maj Antônio Carlos Rodrigues Guimarães - D.Sc.

Aprovada em 04 de fevereiro de 2016 pela seguinte Banca Examinadora:

---

Maj Antônio Carlos Rodrigues Guimarães – D.Sc. do IME - Presidente

---

Maj Ben-Hur de Albuquerque e Silva – D.Sc. do IME

---

Laura Maria Goretti da Motta – D.Sc. da COPPE/UFRJ

Rio de Janeiro

2016

À Deus, pela certeza de que a vitória virá em meio às dificuldades;  
À minha querida e amada esposa Luciane, pelo companheirismo, compreensão, auxílio e, sobretudo, amor que me dá a vida.

## AGRADECIMENTOS

À minha querida esposa que sempre me apoiou, me compreendeu e me incentivou na longa caminhada até a conclusão deste trabalho.

À disponibilidade e a extrema atenção despendidas pelos técnicos e responsáveis do Laboratório de Geotecnia/Pavimentos da COPPE/UFRJ, principalmente aqueles com quem tive o prazer do contato direto: Prof. Laura Motta, Carlos Correia e Silva, Allan Moreno Fernandes e Leandro Pereira dos Santos.

À Samarco SA pelo fornecimento do resíduo, à Prefeitura Municipal do Rio de Janeiro por disponibilizar prontamente os agregados tradicionais (brita e areia) e à BR Distribuidora que cooperou com o ligante asfáltico deste trabalho.

Aos incansáveis laboratoristas Claudeny, Felipe e André do Laboratório de Ligantes e Misturas Betuminosas do IME, pela paciência em passar a enorme experiência prática que contribuiu em muito para este estudo.

Aos professores do Curso de Mestrado em Infraestrutura dos Transportes do IME, pelos ensinamentos transformadores.

À equipe da PG do IME, especialmente ao Sargento Oazen e Sargento Dias, pela ajuda nas questões administrativas e os Sargentos Mello e Gonçalves que sempre apoiaram na utilização dos equipamentos do laboratório de Solos do IME.

Aos colegas de mestrado do IME, turmas de 2014 e 2015, que com certeza se transformaram em grandes amigos e sempre me apoiaram nos momentos difíceis.

Em especial ao Professor e Orientador Maj. Antônio Carlos Rodrigues Guimarães que confiou em mim quando me propôs este tema que muito me agradou e possibilitou o meu crescimento profissional e, apesar do tempo escasso e de diversos outros afazeres, me prestou inestimáveis contribuições com orientações precisas e sempre acertadas sobre o tema deste trabalho.

“Comece a fazer o que é necessário, depois o que  
é possível e, de repente, estará fazendo o  
impossível.”  
FRANCISCO DE ASSIS

## SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES .....	10
LISTA DE TABELAS .....	12
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS .....	14
LISTA DE SIGLAS.....	17
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>20</b>
1.1 O problema .....	20
1.2 Objetivo.....	22
1.2.1 Objetivo principal .....	22
1.2.2 Objetivos específicos .....	22
1.3 Justificativa .....	23
1.4 Escopo do trabalho .....	24
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>25</b>
2.1 A mineração.....	25
2.1.1 Atividade mineradora .....	25
2.1.2 A mineração no Brasil.....	28
2.1.3 Geração e disposição de resíduos de mineração .....	32
2.2 Características dos rejeitos de minérios de ferro .....	36
2.2.1 Caracterização química e mineralógica .....	37
2.2.2 Caracterização ambiental .....	38
2.2.3 Uso de resíduos de minério de ferro em pavimentação.....	39
2.3 Pavimentação .....	41
2.4 O fenômeno do trincamento por fadiga.....	43
2.5 Deformação permanente em concreto asfáltico .....	44
2.5.1 Ligante asfáltico .....	46
2.5.2 Agregados .....	47
2.6 Processamento das curvas de compactação giratória.....	51
2.7 Caracterização mecânica das misturas .....	56
2.7.1 Ensaio de módulo de resiliência .....	57
2.7.2 Ensaio de vida de fadiga.....	59



2.7.3	Ensaio uniaxial de carga repetida .....	61
2.7.4	Perda por umidade induzida .....	65
2.8	Avaliação econômica de projetos .....	65
2.8.1	Custos e composição de custos .....	67
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>68</b>
3.1	Metodologia empregada .....	68
3.2	Caracterização dos agregados e do resíduo .....	71
3.3	Ligante asfáltico .....	74
3.4	Dosagens das misturas asfálticas .....	75
3.4.1	Dosagem segundo o método Marshall .....	77
3.4.2	Dosagem segundo o método SUPERPAVE .....	78
3.5	Ensaio mecânicos .....	81
3.5.1	Módulo de resiliência .....	81
3.5.2	Resistência à tração estática .....	82
3.5.3	Vida de fadiga .....	83
3.5.4	Ensaio uniaxial de cargas repetidas .....	84
3.5.5	Perda por umidade induzida .....	86
3.6	Análise comparativa econômica .....	87
3.7	Materiais empregados .....	88
3.7.1	Resíduo do beneficiamento do minério de ferro .....	88
3.7.2	Caracterização dos agregados .....	90
3.7.3	Ligante asfáltico .....	93
3.8	Análise granulométrica .....	95
3.8.1	Agregados e resíduo .....	95
3.8.2	Misturas para metodologia Marshall .....	97
3.8.3	Misturas para metodologia SUPERPAVE .....	99
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISES</b> .....	<b>103</b>
4.1	Dosagem Marshall .....	103
4.1.1	Resultados da mistura M1 .....	103
4.1.2	Resultados da mistura M2 .....	105
4.1.3	Resultados da mistura M3 .....	107
4.1.4	Comparação entre as misturas .....	109

4.2	Resultados dos ensaios mecânicos.....	110
4.2.1	Módulo de resiliência .....	110
4.2.2	Resistência à tração .....	113
4.2.3	Vida de fadiga.....	113
4.2.4	Simulação no SISPAV .....	115
4.3	Dosagem SUPERPAVE.....	120
4.3.1	Determinação do teor de projeto da mistura M1 .....	120
4.3.2	Determinação do teor de projeto da mistura M2.....	121
4.3.3	Comparação entre as misturas.....	123
4.3.4	Índices de compactação giratória .....	125
4.3.5	Ensaio uniaxial de cargas repetidas .....	127
4.3.6	Perda por umidade induzida .....	128
4.4	Análise comparativa econômica .....	128
4.4.1	Custo unitário total.....	129
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS .....</b>	<b>133</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>137</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIG. 2.1	Valor da Produção Mineral Brasileira. ....	26
FIG. 2.2	Variação do IPM do 1º semestre 2012 a 2015. ....	27
FIG. 2.3	Principais depósitos minerais do Brasil. ....	29
FIG. 2.4	Distribuição das empresas mineradoras no Brasil. ....	29
FIG. 2.5	Produção de minerais em Minas Gerais. ....	32
FIG. 2.6	Fluxograma característico de tratamento de minério. ....	35
FIG. 2.7	Representação granulométrica dos rejeitos da mineração. ....	36
FIG. 2.8	Determinação do CDI, TDI e TDI <sub>m</sub> a partir da curva do CGS. ....	54
FIG. 2.9	Esquema do uso do CDI como parâmetro de dosagem com o CGS. ....	54
FIG. 2.10	Esquema representativo do PTA. ....	56
FIG. 2.11	Esquema de carregamento no ensaio de MR. ....	58
FIG. 2.12	Carregamento aplicado no ensaio uniaxial de carga repetida a 60°C. ....	62
FIG. 2.13	Gráfico Deformação permanente acumulada versus N <sub>ciclos</sub> . ....	63
FIG. 2.14	Deformação plástica ( $\epsilon_p$ ) acumulada em função do número de ciclos. ....	63
FIG. 2.15	Gráfico deformação plástica e taxa de deformação no ensaio de FN. ....	64
FIG. 3.1	Etapas do trabalho experimental desta pesquisa. ....	70
FIG. 3.2	Equipamento AIMS utilizado na pesquisa. ....	72
FIG. 3.3	Agregados dispostos nas bandejas circulares do equipamento AIMS. ....	73
FIG. 3.4	Equipamento <i>Brookfield</i> utilizado nesta pesquisa. ....	75
FIG. 3.5	Representação esquemática das misturas testadas nesta pesquisa. ....	76
FIG. 3.6	Compactador giratório <i>Superpave</i> (CGS) COPPE/UFRJ. ....	79
FIG. 3.7	Equipamento para ensaio de MR do IME, utilizado nesta pesquisa. ....	82
FIG. 3.8	Equipamento de ensaio RT, utilizado nesta pesquisa. ....	83
FIG. 3.9	Equipamento para ensaio de fadiga do IME, utilizado nesta pesquisa. ....	84
FIG. 3.10	Equipamento do ensaio de cargas repetidas de FN. ....	85
FIG. 3.11	Corpo de prova após o ensaio de <i>Flow Number</i> com 7% Vv. ....	86
FIG. 3.12	Vista da Barragem de Germano. ....	88
FIG. 3.13	Ponto de coleta de amostras do resíduo usado nesta pesquisa. ....	89
FIG. 3.14	Armazenamento do resíduo em tambores, no laboratório do IME. ....	89

FIG. 3.15 Amostra do resíduo utilizado nesta pesquisa. ....	90
FIG. 3.16 Curva viscosidade x temperatura do CAP utilizado nesta pesquisa. ....	94
FIG. 3.17 Representação da granulometria dos agregados desta pesquisa. ....	96
FIG. 3.18 Curvas granulométricas das misturas asfálticas nesta pesquisa. ....	99
FIG. 3.19 Representação gráfica da mistura M1 com TMN de 19mm. ....	101
FIG. 3.20 Representação gráfica da mistura M2 com TMN de 12,5mm. ....	102
FIG. 4.1 Teor de asfalto versus Vv e RBV da mistura M1. ....	105
FIG. 4.2 Teor de asfalto versus Vv e RBV da mistura M2. ....	106
FIG. 4.3 Teor de asfalto versus Vv e RBV da mistura M3. ....	108
FIG. 4.4 Comparativo de MR das misturas desta pesquisa. ....	112
FIG. 4.5 Resistência à Tração das misturas avaliadas nesta pesquisa. ....	113
FIG. 4.6 Curva de fadiga das misturas Marshall desta pesquisa ( $\Delta\sigma \times N_f$ ) ....	114
FIG. 4.7 Curva de fadiga das misturas Marshall desta pesquisa ( $\epsilon_r \times N_f$ ) ....	114
FIG. 4.8 Estrutura do pavimento simulado na comparação das misturas. ....	116
FIG. 4.9 Teor de asfalto versus Vv e RBV da mistura M1 do método <i>Superpave</i> . ....	121
FIG. 4.10 Teor de asfalto versus Vv e RBV da mistura M2 do método <i>Superpave</i> . ....	122
FIG. 4.11 Curva de compactação giratória da mistura M1. ....	125
FIG. 4.12 Curva de compactação giratória da mistura M2. ....	126
FIG. 4.13 Ficha de composição de custo do Resíduo. ....	129
FIG. 4.14 Ficha de composição de custo do CBUQ referência do DNIT. ....	130
FIG. 4.15 Ficha de composição de custo do CBUQ com resíduo. ....	130

## LISTA DE TABELAS

TAB. 2.1	Estimativa de produção de minério de ferro no Brasil. ....	30
TAB. 2.2	Produção de pelotas no Brasil. ....	30
TAB. 2.3	Percentagem teórica de ferro de diferentes minerais portadores. ....	33
TAB. 2.4	Composição mineralógica do minério de ferro da Mina de Alegria, MG. .	34
TAB. 2.5	Fatores que afetam o ATR nos revestimentos asfálticos. ....	45
TAB. 3.1	Quantitativo de corpos de prova empregados por etapa. ....	71
TAB. 3.2	Ensaio de caracterização dos agregados. ....	71
TAB. 3.3	Quantidades mínimas de partículas para ensaios no sistema AIMS. ....	73
TAB. 3.4	Lista dos ensaios de caracterização do CAP, utilizado nesta pesquisa. .	74
TAB. 3.5	Nomenclatura das misturas asfálticas utilizadas nesta pesquisa. ....	75
TAB. 3.6	Parâmetros de referência da dosagem Marshall desta pesquisa. ....	77
TAB. 3.7	Parâmetros de referência da dosagem Marshall para VAM. ....	78
TAB. 3.8	Requisitos volumétricos da dosagem <i>Superpave</i> . ....	80
TAB. 3.9	Limites da curva de densificação considerados. ....	81
TAB. 3.10	Resultado dos ensaios de caracterização dos agregados. ....	90
TAB. 3.11	Características de forma dos agregados graúdos desta pesquisa. ....	91
TAB. 3.12	Forma dos agregados graúdos desta pesquisa. ....	92
TAB. 3.13	Características de forma dos agregados miúdos desta pesquisa. ....	92
TAB. 3.14	Forma dos agregados miúdos desta pesquisa. ....	93
TAB. 3.15	Angularidade dos agregados pelo ensaio de vazios sem compactação..	93
TAB. 3.16	Caracterização do CAP 50/70, utilizado nesta pesquisa. ....	94
TAB. 3.17	Parâmetros e referências para a determinação da temperatura do CAP.	95
TAB. 3.18	Granulométrica dos materiais minerais utilizados nesta pesquisa. ....	96
TAB. 3.19	Designação das misturas asfálticas utilizadas nesta pesquisa. ....	97
TAB. 3.20	Proporção dos agregados nas misturas utilizadas nesta pesquisa. ....	98
TAB. 3.21	Granulometrias das misturas para Marshall. ....	98
TAB. 3.22	Pontos de controle TMN - método AASHTO M323-13. ....	100
TAB. 3.23	Granulometrias das misturas para <i>Superpave</i> . ....	101
TAB. 4.1	Parâmetros de dosagem Marshall obtidos para a mistura M1. ....	104

TAB. 4.2	Percentual do Teor de Projeto da mistura M1 pelo método Marshall. ...	105
TAB. 4.3	Parâmetros da dosagem Marshall obtidos para a mistura M2.....	106
TAB. 4.4	Percentual do Teor de Projeto da mistura M2 pelo método Marshall. ...	107
TAB. 4.5	Parâmetros de dosagem Marshall obtidos para a mistura M3.....	107
TAB. 4.6	Percentual do Teor de Projeto da mistura M3 pelo método Marshall. ...	108
TAB. 4.7	Parâmetros finais da dosagem Marshall desta pesquisa.....	109
TAB. 4.8	Ensaio de MR das misturas preparadas pelo método Marshall. ....	111
TAB. 4.9	Tratamento estatístico dos resultados de MR. ....	111
TAB. 4.10	Parâmetros de regressão das curvas de vida de fadiga das misturas...	115
TAB. 4.11	Parâmetros de referência utilizados por GALHARDO (2015).....	117
TAB. 4.12	Parâmetros da camada de revestimento betuminoso desta pesquisa...	117
TAB. 4.13	Espessura mínima dimensionamento DNIT (2006). ....	118
TAB. 4.14	Resultados para Vida Útil das estruturas pelo SisPav.....	119
TAB. 4.15	Comparação entre a estrutura do pavimento. ....	119
TAB. 4.16	Parâmetros de dosagem <i>Superpave</i> obtidos para a mistura M1. ....	120
TAB. 4.17	Percentual do Teor de Projeto da mistura M1 pelo método <i>Superpave</i> . 121	
TAB. 4.18	Parâmetros de dosagem <i>Superpave</i> obtidos para a mistura M2. ....	122
TAB. 4.19	Percentual do Teor de Projeto da mistura M2 pelo método <i>Superpave</i> . 123	
TAB. 4.20	Propriedades da mistura M1 pelo método <i>Superpave</i> .....	123
TAB. 4.21	Propriedades da mistura M2 pelo método <i>Superpave</i> .....	124
TAB. 4.22	Resumo das características das misturas. ....	124
TAB. 4.23	Parâmetros retirados das curvas de compactação giratória. ....	126
TAB. 4.24	Valores de referência para os Índices CDI, TDI e PTA.....	126
TAB. 4.25	Resultados do ensaio uniaxial de carga repetida ( <i>FN</i> ). ....	127
TAB. 4.26	Resumo dos valores do ensaio.....	128
TAB. 4.27	Comparação de custo unitário do material utilizado nesta pesquisa. ....	131
TAB. 4.28	Distância máxima de instalação da usina de asfalto, desta pesquisa. ..	131
TAB. 4.29	Quantidade de resíduo em 1 km de CBUQ. ....	132

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

### ABREVIATURAS

ACB	-	Análise entre Custo e Benefício
AIMS	-	<i>Aggregate Imaging System</i>
ATR	-	Afundamento de trilha de roda
CA	-	Concreto Asfáltico
CAP	-	Cimento asfáltico de petróleo
CBUQ	-	Concreto Betuminoso Usinado à Quente
CDI	-	<i>Compaction Densification Index</i>
CFI	-	<i>Compaction Force Index</i>
CGS	-	Compactador Giratório <i>Superpave</i>
CP	-	Corpo de prova
ESALs	-	<i>Equivalent Single Axle Loadings</i>
FC	-	Fluxo de caixa
FN	-	<i>Flow Number</i>
HVS	-	<i>Heavy Vehicle Simulator</i>
IPM	-	Índice de Produção Mineral
ISC	-	Índice de Suporte Califórnia
LDM	-	Linha de densidade máxima
LVDT	-	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
MR	-	Módulo de resiliência
NBR	-	Norma Brasileira
PIB	-	Produto Interno Bruto
PTA	-	Ponto de Travamento dos Agregados
RBV	-	Relação betume-vazios
RC	-	Resistência à compressão
RT	-	Resistência à tração indireta
RRT	-	Razão entre a resistência à tração indireta, antes e após o teste de <i>Lottman</i>

RTFOT	-	<i>Rotating Thin Film Oven Test</i>
SHRP	-	<i>Strategic Highway Research Program</i>
SisPav	-	Sistema de Dimensionamento de Pavimentos
SICRO 2	-	Sistema de Custo Rodoviário 2
<i>Superpave</i>	-	<i>Superior Performing Asphalt Pavement</i>
TC	-	Tensão controlada
TFI	-	<i>Traffic Force Index</i>
TDI	-	<i>Traffic Densification Index</i>
TDS	-	Taxa de desconto social
TMN	-	Tamanho máximo nominal
TDI <sub>m</sub>	-	<i>TDI modificado</i>
TRI	-	Taxa interna de retorno
VAM	-	Vazios do agregado mineral
VPL	-	Valor presente líquido
ZR	-	Zona de restrição



## SÍMBOLOS

$C$	-	Fator de correção <i>Superpave</i>
$d$	-	Diâmetro da peneira
$D$	-	Tamanho máximo do agregado
$\Delta\varepsilon$	-	Diferença de deformações
$\Delta\sigma$	-	Diferença de tensões
$\varepsilon$	-	Deformação média
$\varepsilon_p$	-	Deformação permanente acumulada
$\varepsilon_r$	-	Deformação específica resiliente
$G_{mb}$	-	Densidade aparente da mistura asfáltica
$G_{mb}$ (estimada)	-	Densidade aparente estimada durante a compactação no CGS
$G_{mm}$	-	Densidade máxima medida da mistura
$\gamma_w$	-	Massa específica da água
$\mu$	-	Coefficiente de Poisson
$n$	-	Expoente (número de Fuller)
$N$	-	Número de ciclos
$N_{des}$	-	Número de giros de projeto
$N_f$	-	Vida de fadiga
$N_{ini}$	-	Número de giros inicial
$N_{max}$	-	Número de giros máximo
$P$	-	Porcentagem de material que passa na peneira de diâmetro $d$
$P_{max}$	-	Carga máxima
$P_{cont}$	-	Carga de contato
$R^2$	-	Coefficiente de determinação
$\sigma_t$	-	Tensão de tração
RBV	-	Relação betume-vazios
RPB	-	Relação pó-betume
$V_a$	-	Vazios com ar da mistura
$V_v$	-	Volume de vazios com ar
$V_{mx}$	-	Volume do corpo de prova
$W_m$	-	Massa do corpo de prova

## LISTA DE SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BNDES	Banco Nacional do Desenvolvimento
CENPES/PETROBRAS	Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
COPPE/UFRJ	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia
DIPLAM	Diretoria de Planejamento e de Desenvolvimento da Mineração
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
IME	Instituto Militar de Engenharia
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
MDIC	Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior.
SECEX	Secretaria do Comércio Exterior
SINFERBASE	Sindicato Nacional da Indústria de Mineração
UNCTAD	Conferência das Nações Unidas para o Comércio e o Desenvolvimento.

## RESUMO

A crescente produção mundial de aço tem contribuído para a geração de milhões de toneladas de resíduos de mineração anualmente. Por outro lado, a enorme demanda de agregados para a execução de pavimentos e a exiguidade de matéria-prima para este fim, torna-se vital a pesquisa de novos materiais para utilização nesta área. Portanto, encontrar uma destinação para este resíduo, assim como, verificar a sua aplicabilidade como um material reaproveitável em pavimentação rodoviária, se tornará uma das ferramentas essenciais, capaz de reduzir o impacto ambiental negativo cada vez mais grave da estocagem deste resíduo. O resíduo arenoso estudado foi coletado no município de Mariana - MG, fruto do beneficiamento do minério de ferro da empresa Samarco S.A. Esta pesquisa tem como objetivo principal a avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas utilizando resíduo do beneficiamento do minério de ferro em substituição do agregado miúdo nas misturas asfálticas do tipo Concreto Asfáltico (CA), visando seu emprego na camada de rolamento de um pavimento rodoviário. Para tanto, realizou-se a dosagem Marshall de três misturas asfálticas e os ensaios mecânicos caracterizados pelo módulo de resiliência e de vida de fadiga à tensão controlada. Foi realizada também, a determinação do teor ótimo pelo método de dosagem *Superpave* conduzida em duas destas misturas para a obtenção dos Índices de Compactação e do comportamento mecânico pelo valor de *Flow Number*. Por fim, realizou-se um estudo comparativo de custos entre as misturas utilizadas. Concluiu-se que o resíduo é compatível com todas as normas vigentes para a utilização em misturas asfálticas, podendo ser utilizado em camada de rolamento de CBUQ, apresentando uma melhora no comportamento em relação à mistura padrão; A sua utilização nas misturas asfálticas apresentou-se viável economicamente em relação à hipótese estudada, proporcionando, uma minimização dos problemas ambientais gerados por estes resíduos na atividade mineradora.

## ABSTRACT

The growing steel production worldwide has contributed to the generation of millions of tons of mining waste annually. Allied to enormous demand of aggregates for the execution of pavements and the shortage of raw materials for this purpose, it becomes vital research about new materials for use in this area. Therefore, finding a solution to the allocation and utilization of this waste, as well as verify in practice the real applicability of the mining waste as a reusable material into road paving, will become one of the essential tools capable of reducing the negative environmental impact increasingly aggravating. The sandy residue studied was collected in the municipality of Mariana - MG, of the result of the company's iron ore beneficiation Samarco SA. This research has as main objective to evaluate the performance of asphalt mixtures performance using iron ore processing residue in the fine aggregate replacement in asphalt mixtures type Asphalt Concrete Machined the Hot, aiming its use in bearing layer of a road surface. For that, there was the Marshall dosing in the three asphalt mixtures and the mechanical tests characterized by resilient modulus test and stress-controlled fatigue test. It also performed the Superpave dosage conducted in two of these mixtures for characterization of the mixture and to obtain the compaction index and mechanical behavior and the mechanical behavior through the Flow Number. Finally, there was a comparative study of costs between the mixtures used. It is concluded that the residue with mixture meets all the regulations in force for use in asphalt mixtures and can be used in rolling layer CBUQ, linked to that there was an improvement in performance over the standard mixture and its use in blends asphalt had to be economically viable, thereby providing a minimization of the environmental problems generated by these waste in the mining activity.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 O PROBLEMA

O Brasil apresenta uma das maiores reservas naturais de minério de ferro do mundo (MONTE *et al.*, 2001). Este minério é extraído de diferentes jazidas, sendo que, após o seu beneficiamento, é geralmente transportado para exportação ou diretamente para usinas siderúrgicas nacionais.

A produção nacional da indústria extrativista mineral registrou expansão de 15,5% no primeiro semestre de 2015, na comparação com o mesmo período do ano anterior, conforme o Índice de Produção Mineral (IPM), apresentado pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) no Informe Mineral 1º/2015. Este crescimento aconteceu principalmente em função do aumento na produção dos minérios de ferro (17,16%), cobre (61,44%) e manganês (21,07%).

Associada a essa situação, embora esse crescimento na produção tenha um aspecto positivo no cenário econômico brasileiro, é também importante ressaltar um aspecto negativo como aumento da geração em massa de resíduos.

A questão ambiental é motivo de grandes preocupações. A exploração dos recursos naturais e a geração de resíduos em elevadas proporções, principalmente na construção civil, tem estimulado a comunidade científica para o estudo do reaproveitamento destes resíduos (SILVA FILHO, 2001).

Os resíduos são materiais que resultam de várias atividades, sendo as principais: industriais, mineração, agricultura e habitação. Pesquisas em todo o mundo vêm sendo desenvolvidas, com o objetivo de reduzir o descarte dos resíduos, uma vez que essa preocupação traz ganhos significativos quando se trata do custo e benefício, pois novas áreas e aterros onde são dispostos estes rejeitos estão cada vez mais difíceis de viabilizar, aliado a toda uma estrutura de proteção que viabilize a minimização ou descontaminação do meio ambiente (PEREIRA, 2012).

Segundo MOTA (2006), a utilização que o homem tem feito dos recursos naturais nem sempre ocorreu considerando suas características e as capacidades

de recuperação dos mesmos. Atualmente, a sociedade como um todo se preocupa com os problemas ambientais. O surgimento de problemas ambientais graves, com reflexos sobre o próprio homem, levou-o a procurar compreender melhor os fenômenos naturais e a entender que deve agir como parte integrante do sistema natural.

Na mineração são gerados dois tipos principais de resíduos que são: os estéreis, produzidos pela lavra ou retirada do minério da jazida, e os rejeitos, produzidos pelo seu beneficiamento. Segundo BOSCOV (2008) para cada tonelada de minério de ferro é produzida em média 0,5 toneladas de rejeitos, sendo a razão gravimétrica entre o produto final e os rejeitos produzidos de 2:1.

Portanto, a conservação do meio ambiente representa para as empresas uma responsabilidade incontestável. Por outro lado, cada vez mais o mercado exige da empresa uma atuação transparente e concreta de preservação e conservação de meio ambiente, a qual se materializa pela realização de atividades que representem um mínimo impacto ambiental (RIBÓ, 2000).

Além disso, um dos maiores problemas de gestão de resíduos (sólidos e líquidos) é a destinação a ser dada aos mesmos. Muitas vezes, é difícil encontrar terrenos para receber os resíduos sólidos e corpos d'água para diluir os despejos líquidos. Desta forma, o reaproveitamento dos mesmos surge como uma medida a ser adotada. Mais do que o lucro financeiro devem ser considerados, com esta prática, os seus benefícios ambientais (MOTA, 2006).

Corroborando com isso, o reaproveitamento de resíduos é mais desejável e eficaz que a disposição em aterros, pois além de permitir a redução da extração de matérias primas, preserva os recursos naturais, zelando pela qualidade ambiental (SILVA FILHO, 2001).

Logo, encontrar uma solução para a destinação e utilização deste resíduo, assim como, verificar na prática a real aplicabilidade do resíduo da mineração como um material reaproveitável em pavimentação rodoviária, pode se tornar uma das ferramentas essenciais capaz de reduzir o impacto ambiental negativo cada vez mais grave das barragens de rejeitos. Em geral a pavimentação requer grandes volumes de materiais minerais (MOTTA & UBALDO, 2013).

## 1.2 OBJETIVO

### 1.2.1 OBJETIVO PRINCIPAL

Esta pesquisa tem como objetivo principal a avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas utilizando resíduo do beneficiamento do minério de ferro em substituição ao agregado miúdo nas misturas asfálticas do tipo Concreto Asfáltico, visando seu emprego na camada de rolamento de um pavimento rodoviário.

### 1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos propostos são:

- Avaliar o comportamento mecânico de misturas asfálticas dos tipos concreto asfáltico (CA), utilizando a fração arenosa do resíduo do beneficiamento do minério de ferro em substituição à areia;
- Realizar estudo comparativo do traço da mistura contendo resíduo do beneficiamento do minério de ferro, pela metodologia tradicional denominada Marshall e em relação à metodologia conhecida como *Superpave*;
- Realizar o dimensionamento de um pavimento típico, com o intuito de comparar os materiais estudados mediante análises mecanística-empíricas;
- Apresentar um material ecologicamente alternativo para ser usado na pavimentação regional, tendo em vista a escassez de jazidas de materiais naturais na região que disponha de licenciamento ambiental para exploração; e
- Propor uma alternativa de uso para o grande volume de rejeitos produzido pela empresa mineradora, visando à redução do volume das pilhas de rejeito com a consequente redução de possíveis impactos ambientais provocados pela atividade de mineração.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

Devido ao crescente desenvolvimento econômico brasileiro vivido nos últimos anos, tem-se observado um aumento na construção e na restauração das rodovias. Para tanto, a demanda por insumos naturais para satisfazer estas obras tende a aumentar, porém, observa-se a escassez de matéria-prima para suprir esta necessidade. Surge com isso, a necessidade de materiais alternativos que supram a esta demanda.

Arelado a isto, a atividade mineradora gera uma quantidade significativa de estéreis e rejeitos, subprodutos inerentes ao processo de lavra e beneficiamento do minério, sendo que a disposição destes materiais afeta de forma qualitativa e quantitativa o meio ambiente.

Verifica-se que a engenharia rodoviária tem sido alvo de grandes projetos de pesquisas que apontam a viabilidade técnica do uso de agregados reciclados e de rejeitos, podendo ser oriundos da construção civil, indústria siderúrgica, mineração, entre outros.

O presente trabalho pretende desenvolver diferentes traços de misturas asfálticas utilizando uma fração arenosa, presente no resíduo do beneficiamento do minério de ferro, em substituição da porção arenosa na composição granulométrica das misturas asfálticas.

Além disso, em paralelo, este trabalho serve de base para o desenvolvimento, no Instituto Militar de Engenharia (IME), da metodologia de dosagem *Superpave*, que se constitui em um conjunto de procedimentos de tal forma que o teor de projeto do ligante é obtido em função do comportamento mecânico das misturas asfálticas, capacitando assim, o Instituto, proceder a ensaios em pavimentos asfálticos utilizando esta técnica de dosagem.

Portanto, esta pesquisa tem como relevância a contribuição para a Sustentabilidade do Planeta, utilizando o resíduo como uma das ferramentas capaz de reduzir o impacto ambiental negativo da atividade mineradora, propondo uma metodologia apropriada para a destinação do referido resíduo e com isso, suprir parte da necessidade de matéria-prima exigida em um setor da construção civil.



## 1.4 ESCOPO DO TRABALHO

O presente estudo foi estruturado em 6 capítulos, os quais estão descritos a seguir:

- Capítulo 1: Traz uma introdução sobre o tema abordado nesta pesquisa e objetivos, bem como a estrutura do trabalho;
- Capítulo 2: Aborda uma revisão bibliográfica sobre o cenário brasileiro de mineração, descrição dos processos envolvidos na produção do rejeito de minério de ferro, bem como os seus impactos ambientais e algumas características apresentadas em pesquisas anteriores. Sucintamente são expostos os conceitos básicos sobre pavimentação, dosagens e ensaios relacionados à metodologia e características das misturas asfálticas. São relatadas ainda pesquisas nacionais já realizadas e práticas de sucesso, indicando a potencialidade do uso deste material em pavimentação e alguns conceitos sobre avaliação de projetos;
- Capítulo 3: Trata da descrição dos métodos e materiais empregados para a realização dos ensaios de laboratório, dos preceitos utilizados para as dosagens e a forma como foi encaminhada a análise comparativa econômica. Também, são apresentados os resultados da caracterização dos materiais utilizados e a granulometria das misturas adotadas nesta pesquisa;
- Capítulo 4: Apresenta os resultados obtidos no trabalho e são tecidos alguns comentários sobre os mesmos, caracterizando a possibilidade de utilização do resíduo em substituição da areia, aborda uma análise mecanicista de um pavimento típico e finaliza com os resultados da análise econômica das misturas;
- Capítulo 5: Traz as conclusões obtidas a partir da análise dos resultados laboratoriais e sugestões para futuros trabalhos; e
- Capítulo 6: São listadas as referências bibliográficas deste trabalho.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, apresenta-se a fundamentação teórica considerada necessária para a avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas utilizando resíduo do beneficiamento do minério de ferro, partindo da situação da atividade mineradora, da origem do resíduo, algumas características já conhecidas do mesmo por estudos anteriores. Além disto, uma abordagem dos métodos de dosagem e de ensaios utilizados em misturas asfálticas e, por fim, aborda-se o conceito de avaliação econômica de projetos.

### 2.1 A MINERAÇÃO

O objetivo final da mineração é extrair, produzir e vender um bem mineral, de interesse econômico e potencialmente atraente ao mercado consumidor, em condições técnicas e econômicas adequadas e sem impactos socioambientais incompatíveis (GOMES, 2007). Neste propósito, a mineração constitui atividade básica de sustentação econômica de um país e, ao mesmo tempo, um agente potencialmente degradante do meio físico local, gerando ainda enormes volumes de resíduos finais, muitas vezes contendo substâncias contaminantes. Nesta temática socioambiental, estão hoje os maiores desafios de implantação e desenvolvimento criterioso de uma empresa de mineração.

#### 2.1.1 ATIVIDADE MINERADORA

A atividade de mineração constitui uma das mais importantes componentes na economia brasileira, sendo um setor dinâmico com elevados índices na geração de renda e empregos, assim como, na exportação em massa de produtos minerais. (RESENDE, 2012).

A indústria mineral brasileira tem registrado, ao longo da última década, um crescimento vigoroso em consequência das profundas mudanças socioeconômicas

e de infraestrutura que o país tem vivenciado, desempenhando um expressivo pilar na economia brasileira.

O que vem impulsionando o crescimento das indústrias mineradoras é, principalmente, o desenvolvimento de países emergentes, cujas áreas territoriais são expressivas, apresentando alta densidade demográfica e alto PIB, como exemplo o Brasil, Rússia, Índia e China, os quais, coincidentemente, são de grande importância para a mineração mundial.

A partir do ano de 2000, observa-se um aumento da demanda por minerais, este crescimento alcançou o seu pico em 2011. Contudo devido à crise econômica que o mundo tem passado nos últimos anos se verificou uma redução do valor da produção mineral, como se pode confirmar na FIG. 2.1.

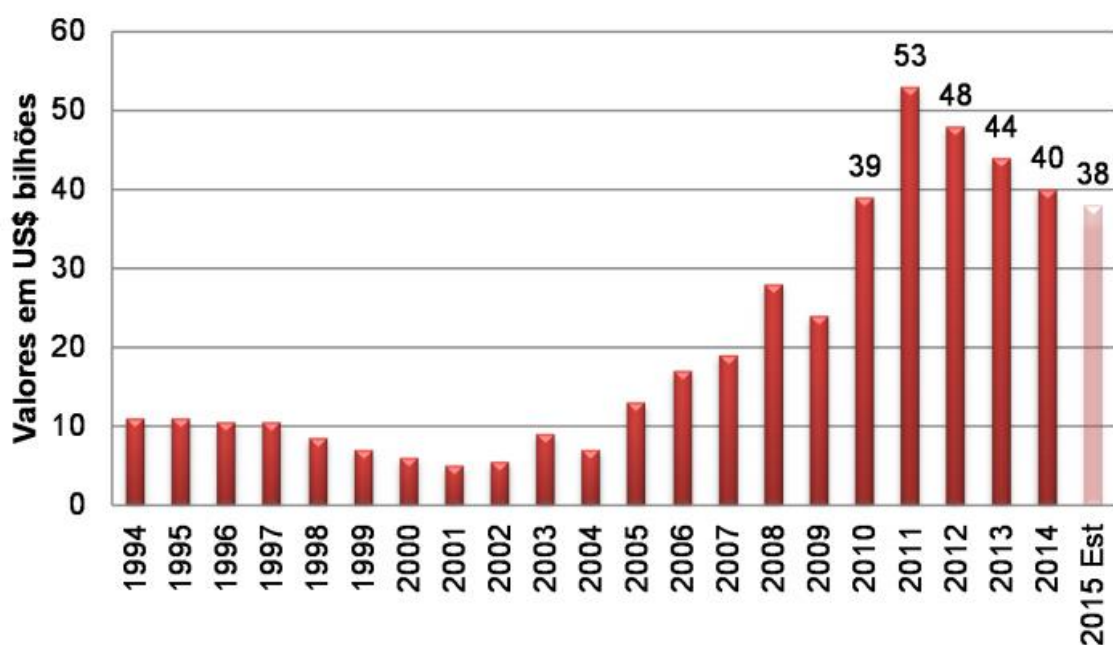


FIG. 2.1 Valor da Produção Mineral Brasileira.

Fonte: IBRAM, (2015) – Exclui Petróleo e Gás.

Segundo a Diretoria de Planejamento e de Desenvolvimento da Mineração (DIPLAM), houve uma redução da produção mineral, isto está relacionada à menor demanda global por metais (principalmente pela China), problemas de excesso de oferta, elevados estoques, além da influência do dólar americano. Em especial, destaca-se o aumento da oferta do minério de ferro, principalmente pela entrada em operação de novas minas e aumentos de

capacidade de produção na Austrália e no Brasil, além do excesso de oferta de aço na China, os quais têm levado a um forte decaimento do preço do minério de ferro desde o final de 2013 (DNPM, 2015).

De acordo com a Secretária do Comércio Exterior - SECEX, do Ministério do Desenvolvimento, da Indústria e do Comércio Exterior, em 2014, o minério de ferro permaneceu liderando, mais uma vez, a pauta de exportações na conta de Produtos Básicos. Minério de ferro representa 11,47% dos produtos básicos, seguido da soja com 10,34%. E mesmo com uma variação no preço em 2014 (-20,54%), o minério de ferro permaneceu liderando este segmento (IBRAM, 2015).

O Índice da Produção Mineral (IPM), que mede a variação na quantidade produzida, apresentou crescimento de 15,5% no primeiro semestre de 2015 quando comparado a igual período do ano anterior, esta variação está representada na FIG. 2.2 pelo (DNPM, 2015).

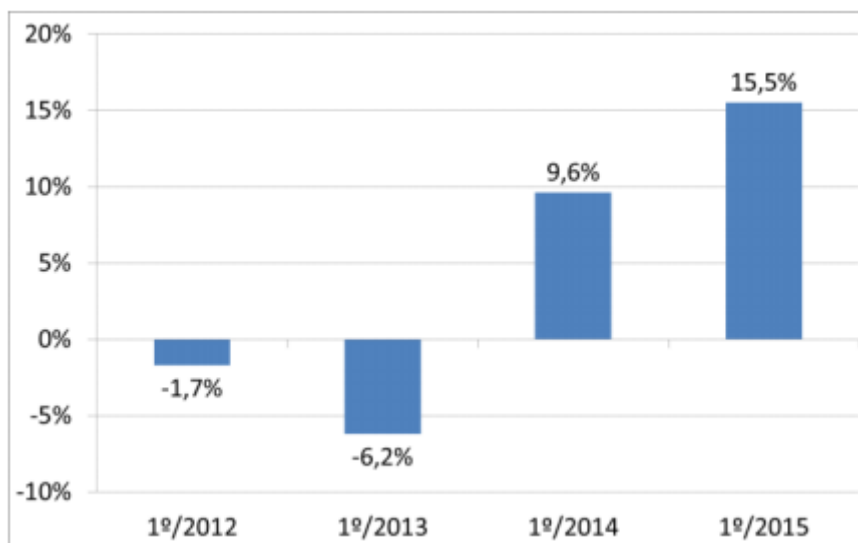


FIG. 2.2 Variação do IPM do 1º semestre 2012 a 2015.

Fonte: DNPM, (2015).

Este comportamento foi alcançado, sobretudo em função do aumento na quantidade produzida dos minérios de ferro (17,16%), cobre (61,44%) e manganês (21,07%). Outras substâncias minerais também contribuíram positivamente, a saber: níquel, alumínio, potássio, caulim, crisotila, nióbio, cromo e grafita (DNPM, 2015).

Segundo a DIPLAM do DNPM (2015), o comportamento da quantidade produzida pela indústria extrativa mineral no primeiro semestre do ano de 2015 teve forte influência do setor exportador, não obstante o recuo de outras atividades econômicas do país.

Segundo o IBGE, a produção física industrial no país no primeiro semestre de 2015, em comparação a igual período de 2014, mostrou uma redução de 6,3%. Dentre os setores associados à indústria mineral que apontaram recuos se destacam: metalurgia (-7,5%), produtos de metal (-8,8%) e produtos de minerais não metálicos (-5,2%), dentre outros. Entretanto, o setor de indústrias extrativas mostrou crescimento de 9,4% no semestre, com destaque para o aumento da produção de minérios de ferro pelletizados e em bruto e óleos brutos de petróleo (DNPM, 2015).

### 2.1.2 A MINERAÇÃO NO BRASIL

O Brasil é um país detentor de um território com extensão continental e de uma notável diversidade geológica propícia à existência de jazidas de vários minerais, algumas de classe mundial, conquistou posição de destaque no cenário global, tanto em reservas quanto em produção mineral. Na FIG. 2.3 pode-se observar esta diversidade de materiais existentes no Brasil (IBRAM, 2012).

O Brasil é o segundo maior produtor de minério de ferro, conforme o *U.S. Geological Survey* e a UNCTAD (Conferência das Nações Unidas para o Comércio e o Desenvolvimento). De acordo com essas fontes, em 2011 os três maiores produtores foram a China com 1,33 bilhão de toneladas, a Austrália com 480 milhões de toneladas e o Brasil com 390 milhões de toneladas. No entanto, quando se leva em conta o teor médio do minério de ferro chinês, a produção daquele país pode ser considerada de 380 milhões de toneladas, comparativamente com o minério de ferro da Austrália e do Brasil (IBRAM, 2012).

Segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM o número de empresas mineradoras no Brasil é de 8.870 em 2013, divididas pelo país conforme apresentado na FIG. 2.4. A característica da indústria da mineração é predominantemente formada por micro e pequenas empresas.

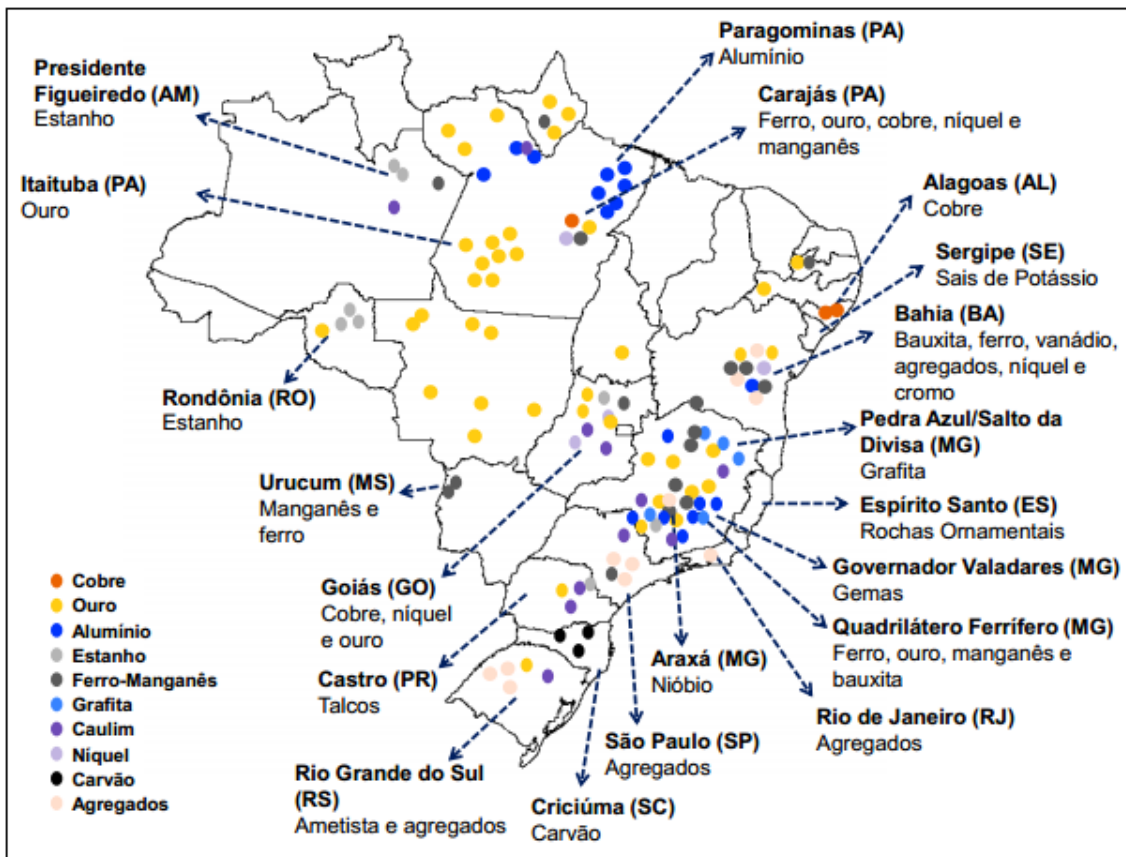


FIG. 2.3 Principais depósitos minerais do Brasil.

Fonte: DNPM, (2015), elaborado IBRAM.

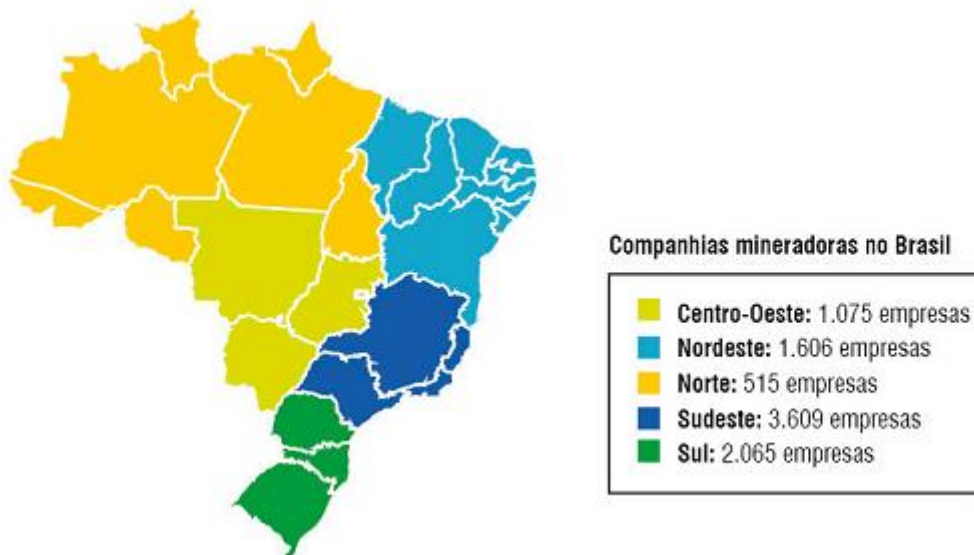


FIG. 2.4 Distribuição das empresas mineradoras no Brasil.

Fonte: DNPM, (2012), elaborado IBRAM.

As maiores empresas produtoras no Brasil são a Vale S.A. (84,52%), CSN (5,45%), Samarco (6,29%), MMX (2,03%) e Usiminas (1,71%). Os principais estados produtores do Brasil são Minas Gerais (67%) e Pará (29,3%) (IBRAM, 2012).

Segundo dados do IBRAM (2015), o minério de ferro produzido no Brasil em 2014 atingiu 400 milhões de toneladas. Sendo que a produção de finos e granulados foi de 399,4 milhões de toneladas em 2014, e a de pelotas, 58,9 milhões de toneladas, fato verificado na TAB. 2.1 onde é apresentada uma estimativa de produção de finos e granulados de minério de ferro pelas empresas.

TAB. 2.1 Estimativa de produção de minério de ferro no Brasil.

Produção Brasileira de minério de ferro	Milhões t/ano Ano 2014	Milhões t/ano Ano 2013
VALE S.A.	319,2	299,8
CSN/Namisa	33,0	25,7
Gerdau	7,6	11,5
Usiminas	6,0	7,0
COMISA – Cia. De Mineração Serra Azul	6,0	6,0
VALLOUREC (V&M Mineração)	4,0	4,0
Ferrous Resources	3,8	5,1
MMX	2,7	5,9
Arcelor Mittal	2,6	4,3
MINERITA – Minérios Itaúna Ltda.	2,0	2,3
Zamin Ferrous	1,5	6,0
Vetria Mineração S.A.	1,0	1,5
OUTRAS	10,0	12,0
<b>TOTAL (minérios)</b>	<b>399,4</b>	<b>391,1</b>

Fonte: IBRAM, (2015).

Na TAB. 2.2 estão apresentados os resultados na produção de pelotas segundo IBRAM (2015).

TAB. 2.2 Produção de pelotas no Brasil.

Produção de pelotas	Milhões t/ano Ano 2014	Milhões t/ano Ano 2013
VALE S.A.	34,4	30,7
Samarco	24,5	22,2
<b>TOTAL</b>	<b>399,4</b>	<b>391,1</b>

Fonte: IBRAM/SINFERBASE, (2012).

Conforme apresentado na UNCTAD (Conferência das Nações Unidas Para o Comércio e o Desenvolvimento) - e *U.S. Geological Survey*, o Brasil foi considerado o segundo maior produtor de minério de ferro do mundo, cuja reserva foi de aproximadamente 11% do saldo das reservas mundiais (IBRAM, 2012).

Segundo IBRAM (2012) as reservas medidas e indicadas de minério de ferro no Brasil alcançaram 29 bilhões de toneladas, posicionando o país em segundo lugar em relação às reservas mundiais, que é de 180 bilhões de toneladas.

Contudo, considerando-se as reservas em termos de ferro contido no minério, o Brasil toma uma posição de destaque no cenário mineralógico internacional. Fato este justificado pelo alto teor encontrado nos minérios de hematita (60% de ferro), sendo predominante no Pará, e itabirito (50% de ferro), predominante no estado de Minas Gerais (IBRAM, 2012).

O minério de ferro exportado no Brasil originou-se dos estados de Minas Gerais com 51,6% e Pará com 32%. Segundo o MDIC (2014) – Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, que define o Estado Produtor como sendo, para efeito de divulgação estatística de exportação, a Unidade da Federação onde foram extraídos os minerais ou fabricados os bens manufaturados, total ou parcialmente. Neste último caso, o estado produtor é aquele no qual foi completada a última fase do processo de fabricação para que o produto adote sua forma final (conceito de origem). Importante destacar, que o Estado do Espírito Santo tem a terceira posição como origem do produto em função de sua produção de pelotas.

Dentro deste panorama e levando em consideração que o resíduo utilizado nesta pesquisa tem origem em Minas Gerais, vale ressaltar que, neste estado são extraídos mais de 180 milhões de toneladas/ano de minério de ferro, sendo responsável por aproximadamente 53% da produção brasileira de minerais metálicos e 29% de minérios em geral (IBRAM 2015).

Segunda IBRAM (2015) a atividade de mineração está presente em mais de 400 municípios mineiros, e dos dez maiores municípios mineradores do Brasil, sete estão localizados em Minas Gerais, sendo Itabira/MG o maior município do país em exploração.

Na FIG. 2.5 está apresentada a distribuição da produção de alguns bens minerais em Minas Gerais.



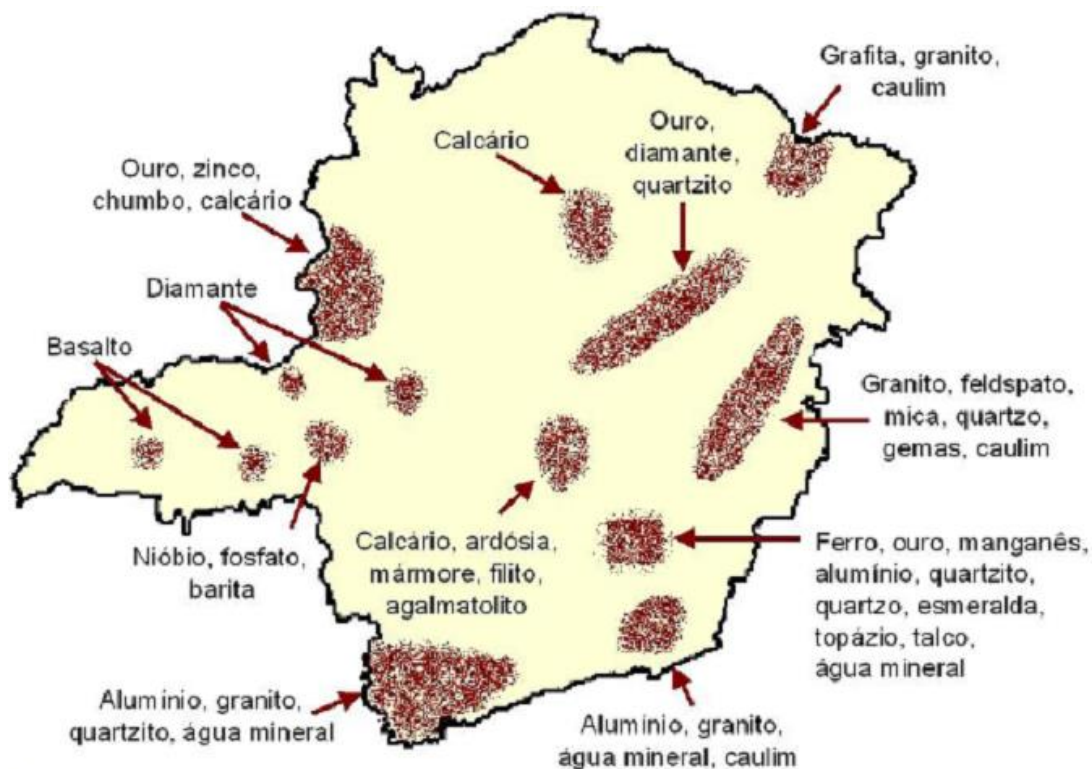


FIG. 2.5 Produção de minerais em Minas Gerais.

Fonte: IBRAM, (2015).

Ainda, segundo a mesma fonte, entre os principais bens minerais produzidos no estado de Minas Gerais pode-se destacar que o referido estado possui a maior produção de minério de ferro, ouro, zinco e fosfato do Brasil. E que a produção de nióbio, neste estado, encontra-se como a maior do mundo. Além disto, possui a 2ª maior produção de bauxita, a 3ª maior produção de níquel e a maior reserva de manganês do Brasil.

### 2.1.3 GERAÇÃO E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO

Segundo LUZ e LINS (2004), o mineral é conceituado como todo corpo inorgânico presente na crosta terrestre, que apresenta composição química e propriedades físicas definidas.

O minério é toda rocha constituída de um mineral ou agregado de minerais contendo um ou mais minerais valiosos, possível de serem aproveitados economicamente (CETEM, 2004).

E mais especificamente, o minério de ferro é a rocha, da qual, pode ser obtido o ferro metálico de maneira economicamente viável. Os minérios de ferro economicamente explorados podem ser classificados de acordo com a composição química do mineral fornecedor do elemento metálico. Estes se classificam em: óxidos, carbonatos, sulfetos e silicatos. Apenas a exploração dos óxidos tem expressão econômica para a obtenção do ferro. Os principais minerais portadores e seus respectivos teores de ferro são mostrados na TAB. 2.3 (MOURÃO, 2008).

TAB. 2.3 Percentagem teórica de ferro de diferentes minerais portadores.

<b>Mineral</b>	<b>Fórmula química</b>	<b>Conteúdo teórico de ferro</b>
Magnetita	$Fe_3O_4$	72,4
Hematita	$Fe_2O_3$	69,9
Goethita	$Fe_2O_3 \cdot H_2O$	62,9
Limonita	$Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$	59,8
Ilmenita	$FeTiO_3$	36,8
Siderita	$FeCO_3$	48,2
Pirita	$FeS_2$	46,5
Pirrotita	$Fe_{(1-x)}S$	61,0

Fonte: MOURÃO, (2008).

Para esta pesquisa foi utilizado o material proveniente da empresa SAMARCO S.A, a qual é a pioneira no Brasil na concentração de itabirito por flotação, um minério que no passado não era explorado devido ao baixo teor de ferro e a granulometria fina.

A empresa mantém usinas industriais em dois estados brasileiros. As atividades de lavra, de beneficiamento, de transporte, da pelotização e do embarque são realizadas, de forma integrada, entre a usina de Germano, localizada no município de Mariana em Minas Gerais e a usina industrial de Ponta Ubu, em Anchieta, no Espírito Santo.

O concentrado do minério de ferro é transportado, em forma de polpa, por um mineroduto de 396 km de extensão, ligando as duas usinas industriais. A localização da usina de pelotização no litoral permite que a empresa mantenha e opere um porto próprio por onde escoar sua produção de pelotas, destinada aos clientes na Europa, Ásia, África, Oriente Médio e Américas.

O processo de produção da SAMARCO S.A. começa na usina de Germano, onde o itabirito é lavrado na mina de Alegria, com reservas estimadas em mais de 5 bilhões de toneladas. O ferro ocorre em uma espessa sequência de formações ferríferas sedimentares metamorizadas em itabirito. Os principais minerais de ferro são hematita, goethita (limonita), hematita especular e magnetita. O quartzo e os silicatos foram removidos da superfície por intemperismo, devido à lixiviação preferencial da sílica, e levou, conseqüentemente, à concentração dos óxidos de ferro no minério residual.

A TAB. 2.4 apresenta a composição mineralógica do minério da mina de Alegria/MG (CETEM, 2002).

TAB. 2.4 Composição mineralógica do minério de ferro da Mina de Alegria, MG.

Principais Minerais	Fórmula química	Distribuição (%)
Hematita especular	$Fe_2O_3$	15,0
Hematita	$Fe_2O_3$	38,0
Magnetita	$Fe_3O_4$	1,0
Goethita	$Fe_2O(OH)$	19,8
Limonita	$FeO(OH)nHO$	2,2
Quartzo	$SiO_2$	24,0

Fonte: CETEM, (2002).

Na fase de lavra, o acesso ao corpo do minério bruto implica em trabalhos de decapeamento e remoção de materiais sem valor comercial, que são chamados genericamente de estéreis, comumente estocados sob a forma de pilhas. O minério é, então, submetido a processos de tratamento ou beneficiamento, caracterizados pelas operações físicas e/ou químicas destinadas a modificar os bens minerais em termos de forma e/ou composição, visando adequá-la às aplicações industriais pertinentes. Os resíduos correspondentes ao processo descrito são denominados de rejeitos (COELHO, 2008).

A FIG. 2.6 apresenta o fluxograma característico de uma planta de tratamento de minério de ferro, resultando tipicamente em um rejeito inerte, ou seja, não contaminado.

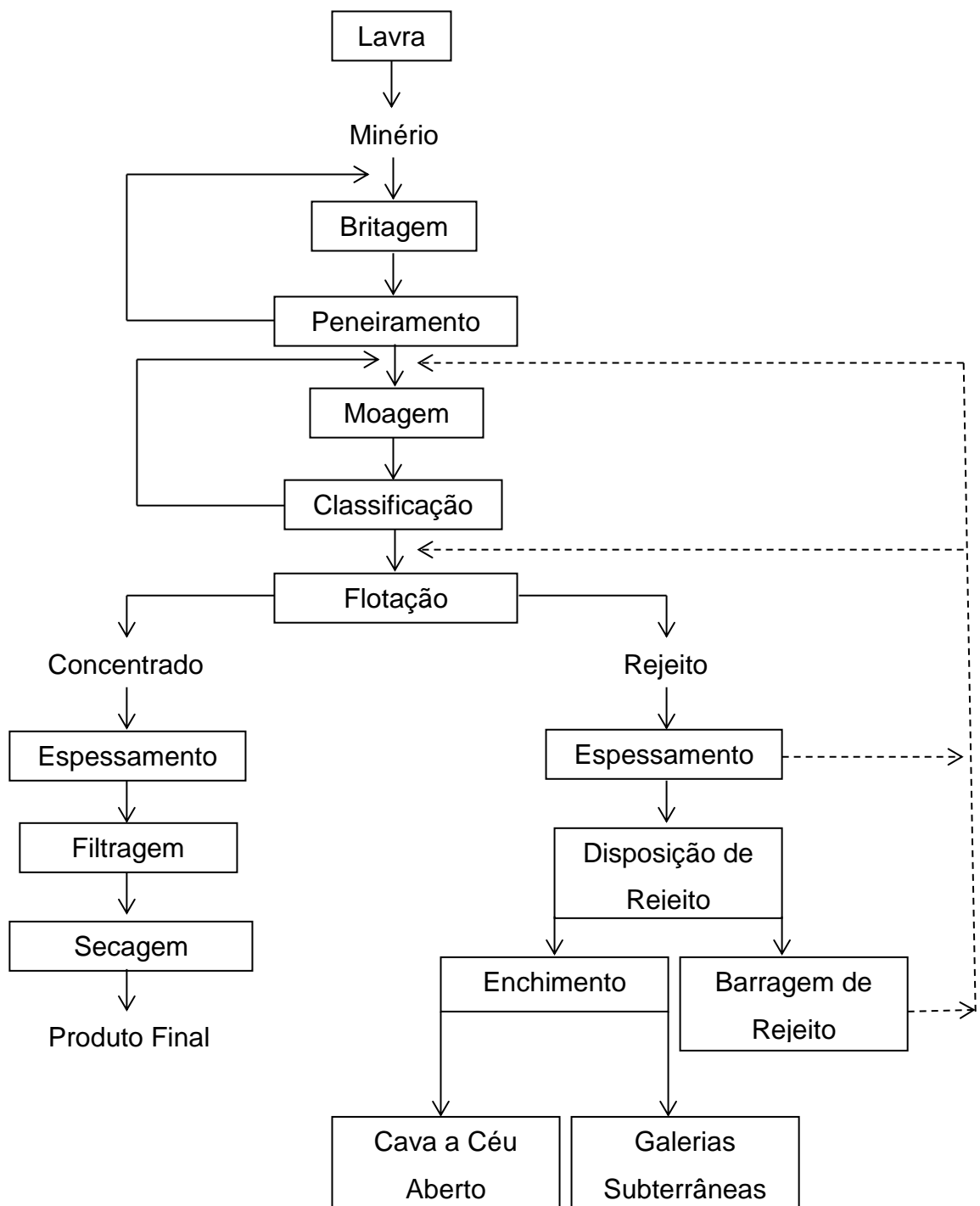


FIG. 2.6 Fluxograma característico de tratamento de minério.

Fonte: COELHO, (2008).

## 2.2 CARACTERÍSTICAS DOS REJEITOS DE MINÉRIOS DE FERRO

Diferentemente de outros setores econômicos, o setor da mineração tem um equacionamento diferenciado em relação à questão ambiental, em função das substâncias minerais serem recursos não renováveis e serem incorporados no processo produtivo (BARRETO, 2001). E, devido esta incorporação não ser em sua totalidade, ocorre à geração de resíduos no decorrer do processo.

Segundo COELHO (2008) os rejeitos apresentam características mineralógicas, físico-químicas e geotécnicas bastante variáveis, em função da natureza do minério bruto e das etapas do processo de beneficiamento industrial. Estes processos podem ser bem distintos, e mais ou menos complexos em função das técnicas adotadas para a liberação da espécie mineral de interesse econômico.

A maioria dos rejeitos de minério de ferro é considerada granular, com boas condições de drenagem e resistência e baixo potencial poluidor, cujo comportamento geotécnico é determinado por essas características e pela forma de deposição.

Segundo CAMPANHA (2011) em uma avaliação crítica dos rejeitos normalmente oriundos de processos de mineração de ferro na região do Quadrilátero Ferrífero do estado de Minas Gerais, revela que geralmente cerca de 60% a 70% destes rejeitos apresentam uma granulometria tendendo às areias finas e médias siltosas. Esta granulometria está representada na FIG. 2.7.

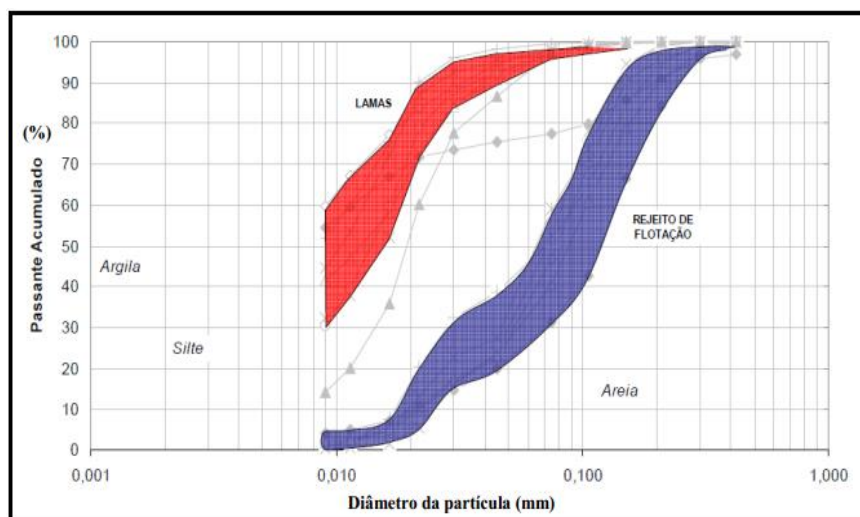


FIG. 2.7 Representação granulométrica dos rejeitos da mineração.

Fonte: CAMPANHA, (2011).

Estes materiais foram classificados com sendo não plásticos ou com baixa plasticidade, além de apresentarem valores de peso específico dos sólidos elevado, superando a 30 kN/m<sup>3</sup>, possivelmente em função dos altos teores de ferro neles contidos (PINTO, 2013).

A constituição do rejeito é caracterizada pela presença bem definida de uma fração líquida e sólida. A fração sólida é formada por partículas com granulometria fina, abrangendo partículas que variam de areia a colóide, com características variadas e diretamente condicionadas às características da jazida e ao processo de beneficiamento do minério de ferro (SILVA, 2010).

RIBEIRO (2000), a variação da granulometria do rejeito na área de deposição está associada a vários fatores. Após o lançamento do rejeito, ocorre a seleção de partículas que são depositadas em diferentes locais ao longo da trajetória do fluxo de lama, em função do tamanho, da forma e da densidade dos grãos.

Ainda segundo o mesmo autor, a predisposição que a fração sólida apresenta em escoar ou sedimentar é caracterizada como segregação hidráulica. Ao escoar ao longo da praia de deposição, o rejeito perde velocidade provocando a diminuição da sua capacidade de arraste, que vai se limitando a partículas cada vez menores.

Além disso, mudança dos canhões de lançamento da lama, interferências de outros canhões próximos e paralisações momentâneas do lançamento provocam mudanças na granulometria do rejeito depositado, ocasionando a formação de bandas de material fino intercaladas entre frações mais grossas (RIBEIRO, 2000).

PRESOTTI (2002) destaca que, apesar dos rejeitos granulares apresentarem comportamento e características de areias, os mesmos não podem ser tratados como tal, pois a forma e o tipo de processamento do minério influenciam as características mineralógicas, físico-químicas e geotécnicas, atribuindo características específicas para cada rejeito.

### 2.2.1 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA

O conhecimento de determinadas características químicas e mineralógicas do rejeito arenoso representa uma importante contribuição para a compreensão do comportamento do mesmo na concretização de diversos trabalhos.

CAMPANHA (2011) apresentou os resultados dos ensaios de difratogramas de raios-x dos rejeitos de concentração e de flotação, onde se constatou a presença do quartzo, hematita e goetita como os principais argilominerais presentes no material. Já em relação aos resultados referentes à análise de espectrometria óptica, as maiores concentrações entre os elementos foram de ferro e de silício.

GALHARDO (2015) caracterizou o mesmo resíduo arenoso que foi utilizado nesta pesquisa, por ensaios de MEV (Microscópio Eletrônico por Varredura) com EDS (*Electron Diffraction Spectroscopy*). Pelo seu estudo, pode-se constatar a presença dos elementos sílica e ferro, tendo uma maior concentração referente ao primeiro material.

No ensaio de difração de Raio-X, Galhardo (2015) observou que o quartzo é o mineral principal, sendo a hematita e goetita os minerais subordinados. Ressaltando que a presença do elemento ferro na amostra, como a hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), goetita ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ) e o quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) justificam o caráter não expansivo do resíduo arenoso.

## 2.2.2 CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL

As avaliações das interações ambientais do uso de rejeitos de mineração devem estar de acordo com a NBR 10.004 (ABNT 2004a, ABNT 2004b e ABNT 2004c), onde define os resíduos sólidos como: resíduos nos estados sólidos e semissólidos resultantes de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição.

A classificação dos resíduos está ligada a seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, a fim de dar um destino adequado e manuseio. A sua periculosidade está intrinsecamente relacionadas às suas propriedades físicas, químicas e/ou infectocontagiosas. A NBR 10.004a tem sua classificação geral dos resíduos em três categorias mostradas a seguir:

- Resíduos Classe I – (Perigosos): São os que apresentam periculosidade ou uma das seguintes características: Inflamabilidade, Corrosividade, Reatividade, Toxicidade e/ou Patogenicidade.

- Resíduos Classe II – (Não Perigosos): São divididos em duas subcategorias:
- Resíduos Classe II A – (Não Inertes): São aqueles que não se enquadram na classificação de Resíduos Classe I - Perigosos ou de Resíduos Classe II B - Inertes. Estes resíduos têm características, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
- Resíduos Classe II B – (Inertes): Quaisquer resíduos quando colocados em contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme NBR 10.006, não tiveram seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

GALHARDO (2015) apresentou os resultados dos ensaios feitos pelo laboratório da ABCP (2013), o qual avaliou os elementos contaminantes presentes no rejeito, com o intuito de obter a classificação e determinar o risco de contaminação do meio ambiente decorrente do emprego deste material na pavimentação. Com relação ao ensaio de teor de matéria orgânica verificou-se que no resíduo não há presença de impurezas orgânicas. Além deste, o ensaio de Lixiviação (NBR 10.004/04) e de Solubilização (NBR 10.006/04), apresentaram bons resultados mostrando com isso, que o rejeito arenoso, proveniente do beneficiamento do minério de ferro, pode ser classificado como Classe II B - Não perigoso e Inerte e, portanto pode ser utilizado na pavimentação.

### 2.2.3 USO DE RESÍDUOS DE MINÉRIO DE FERRO EM PAVIMENTAÇÃO

No Brasil, ainda há uma carência de pesquisas e trabalhos publicados que abordam o uso de rejeito de minério de ferro em pavimentação, em comparação aos resíduos industriais.

FERNANDES (2005) estudou o comportamento mecânico das misturas contendo resíduos de minério de ferro associados à geossintéticos na construção de um trecho experimental de ferrovia, comprovando a qualidade técnica dessas misturas compatível com a de materiais normalmente utilizados em pavimentos ferroviários. Os resultados obtidos demonstraram que os resíduos de minério de



ferro tenderam a apresentar boa capacidade de suporte, valores elevados de densidade e de ISC (Índice de Suporte Califórnia), baixa expansão e elevados módulos de resiliência, propriedades estas fortemente afetadas pela presença do ferro. Entretanto, o referente autor recomenda que sejam executados dispositivos de drenagem adequados para evitar a grande variação do teor de umidade do material de subleito e sublastro ao longo do tempo.

SARAIVA (2006) utilizou resíduos de mineração de ferro como materiais alternativos na construção de um trecho experimental rodoviário na cidade de Itabira, Minas Gerais, e analisou o comportamento geotécnico dos rejeitos de minério de ferro misturados a solos argilosos, como materiais da camada de base, combinando-se com geossintéticos de acordo com a seção-teste. O trecho foi monitorado através de extensômetros elétrico-resistivos e sensores de temperatura e umidade para que os dados coletados, correspondentes às solicitações dinâmicas experimentadas pelo pavimento, fossem comparados diretamente com as deformações medidas no local. Os resultados demonstraram que é tecnicamente viável a utilização do rejeito de minério de ferro na composição de misturas para pavimentos rodoviários e ferroviários.

FERREIRA (2007) estudou o comportamento geotécnico e mecânico de cinco tipos de estéreis de minério de ferro (canga laterita, canga contaminada com minério de ferro, areia laterítica, itabirito pobre amarelo e itabirito cinza) aplicados como materiais de infra e superestrutura em um pavimento rodoviário experimental para tráfego de caminhões fora-de-estrada. Os resultados demonstraram que o pavimento executado com estéreis apresentou desempenho mecânico satisfatório quanto à capacidade de suporte e de durabilidade ante a ação dos caminhões fora-de-estrada e das intempéries. Tal afirmação é sustentada pelo bom estado de conservação da pista após dois meses de monitoramento, tempo superior aos serviços de manutenção das vias empregados na mina.

SILVA (2010) analisou laboratorialmente aspectos físicos e de comportamento mecânico de agregados convencionais e alternativos para uso em revestimento asfáltico do tipo CA na faixa C do DNIT, com a utilização de brita graduada e escória de aciaria, em diferentes proporções, como agregados graúdos e miúdos e o rejeito de minério de ferro como material de enchimento alternativo (fíler). Concluiu-se, com

o estudo, que todas as misturas alternativas analisadas apresentaram desempenho mecânico satisfatório, comprovando a qualidade destes resíduos para uso em camadas de rolamento, além de um grande potencial de uso do rejeito de minério de ferro e da escória de aciaria como agregados alternativos para revestimentos asfálticos com ganhos de natureza ambiental quando comparados aos agregados pétreos.

GALHARDO (2015) avaliou a possibilidade de reaproveitar o rejeito de minério de ferro na construção de camadas estruturais de pavimentos com baixo volume de tráfego, em associação com dois solos: residual de filito e argiloso laterítico, concluindo que a utilização do rejeito arenoso em camadas inferiores de pavimentos asfálticos é viável, pois as misturas contendo este rejeito apresentaram propriedades mecânicas de interesse à pavimentação, proporcionando a minimização dos problemas ambientais das atividades de mineração.

FRIBER (2015) verificou a viabilidade de utilização do agregado calcinado contendo resíduo de mineração na utilização em camadas de pavimento como base, sub-base e capa de rolamento, concluindo que com a mistura do resíduo de mineração no agregado de argila calcinada é viável o uso do mesmo na pavimentação.

Com base nos estudos citados, verifica-se que o resíduo da mineração tem apresentado bons resultados, transformando-se em uma alternativa viável para a utilização na pavimentação, contribuindo assim para a redução da exploração de agregados naturais e colaborando positivamente na questão ambiental, por ser uma alternativa correta de reaproveitamento e destinação dos resíduos que hoje são considerados inservíveis.

## 2.3 PAVIMENTAÇÃO

O pavimento é uma estrutura constituída por múltiplas camadas, que funciona como um sistema integrado. Construído sobre a superfície final de terraplenagem, sua finalidade é resistir às cargas resultantes do tráfego aplicadas em sua superfície e distribuí-las às camadas inferiores, além de oferecer conforto e segurança ao usuário. Esta estrutura deve ainda ter um estado de superfície com uma qualidade

tal que não aumente os custos de manutenção dos veículos que por ela trafegam (BALAGUER, 2012).

A camada de revestimento dos pavimentos tem seu desempenho influenciado pelas características dos materiais que a compõem, pela dosagem destes materiais, pela energia de compactação, pela qualidade de execução, pelo processo construtivo, pelo controle sobre excesso de carga e pela periodicidade da manutenção e restauração (SPECHT, 2004).

A degradação estrutural dos pavimentos flexíveis está associada ao aparecimento, principalmente, dos seguintes defeitos: trincamento por fadiga e deformação permanente.

HUBER (1999) concluiu, após análise de mais de trezentos artigos técnicos com enfoque na deformação permanente de misturas asfálticas, que aproximadamente 38% dos defeitos de pavimentos flexíveis são do tipo trincas por fadiga, 17% têm origem na deformação permanente, 11% são por problemas de execução do pavimento e 34% dos defeitos não tiveram sua causa identificada.

Nos últimos anos, tem sido bastante comum a ocorrência de problemas associados à deformação permanente nos revestimentos asfálticos aplicados em rodovias brasileiras. O que agrava a situação é que este tipo de defeito costuma se manifestar de maneira precoce, prejudicando a serventia dos pavimentos em poucas semanas (NASCIMENTO, 2008).

Segundo NASCIMENTO (2015), os métodos brasileiros mais comuns de dosagem conseguem atender a uma pequena parcela dos fatores causadores do excesso de acúmulo de deformação permanente por uma mistura. Esses procedimentos de dosagem levam em consideração apenas as propriedades volumétricas desses materiais, bem como outros parâmetros, tais como estabilidade e fluência.

Contudo, os ensaios para avaliação da deformação permanente, tais como *Flow Number* e outros que utilizam simuladores de tráfego de laboratório ou de campo (HVS), ainda não são de uso comum na engenharia rodoviária nacional.

Conforme NASCIMENTO (2015) estes ensaios foram desenvolvidos para serem incorporados ao método volumétrico de dosagem *Superpave*, sendo que o *Flow Number*, o *Flow Time* e o módulo dinâmico foram propostos pelo Projeto 9-19 do

*National Cooperative Highway Research Program* (WITCZAK, 2005) para prever o desempenho das misturas asfálticas quanto à deformação permanente.

Apesar de muitos pesquisadores (BAHIA e FAHEEM, 2007; MOURA, 2010; ANTOSCZEZEM JUNIOR, 2012) afirmarem que o desempenho dos pavimentos asfálticos pode ser previsto por meio de suas propriedades mecânicas, o envolvimento de diversos equipamentos e procedimentos acaba distanciando essas pesquisas da prática cotidiana das obras nacionais.

Portanto, enquanto estes procedimentos ainda não forem totalmente estudados e normatizados, e visando diminuir os problemas que causam defeitos no pavimento, deve-se primar pelo estudo dos materiais constituintes do concreto asfáltico, surgindo assim à necessidade de pesquisar novos materiais que poderão interagir e melhorar o desempenho da camada de revestimento, o que de certa forma é menos custoso e mais próximo da prática rodoviária.

#### 2.4 O FENÔMENO DO TRINCAMENTO POR FADIGA

O fenômeno da fadiga em uma estrutura pode ser definido como um processo ao qual um material é sujeito quando submetido a um estado de tensões e deformações repetidas ou oscilantes. Estas tensões, que têm amplitude inferior à tensão de ruptura do material, resultam no trincamento da camada do pavimento após determinado número de aplicações de carga. Ou seja, o material perde resistência com a repetição da aplicação da carga. (PINTO e MOTTA, 1995; RODRIGUES, S. D. apud FRANCO, 2000).

É sabido no meio rodoviário que o defeito mais frequente nos pavimentos flexíveis brasileiros é o trincamento da camada superior do revestimento asfáltico. O trincamento se desenvolve pela flexão alternada da camada superficial apoiada em camadas granulares, geralmente bastante deformáveis elasticamente (MEDINA e MOTTA, 2005).

Segundo PINTO e MOTTA (1995), a vida de fadiga das misturas asfálticas é afetada pelos seguintes fatores:

- Fatores de carga: amplitude, tipo e frequência do carregamento;

- Fatores da mistura: granulometria e qualidade dos agregados, tipo e qualidade do cimento asfáltico, teor do ligante, teor de vazios; e
- Fatores ambientais: temperatura e umidade.

## 2.5 DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM CONCRETO ASFÁLTICO

A deformação permanente, juntamente com a fadiga do revestimento, é considerada como um dos principais defeitos que podem ocorrer nas estruturas dos pavimentos. Particularmente, a deformação permanente pode ser atribuída ao revestimento ou às subcamadas, ou ainda a uma combinação de efeitos (BERNUCCI *et al.*, 2010).

As camadas não asfálticas, abaixo do revestimento, podem apresentar deformações permanentes principalmente por densificação adicional causada pelo tráfego e por ruptura ao cisalhamento. Estes problemas podem ser evitados fazendo-se uma seleção criteriosa dos materiais e por uma compactação adequada das camadas, além de um bom projeto estrutural, de forma a limitar as tensões atuantes aos níveis admissíveis e seguros (BALAGUER, 2012).

Várias podem ser as causas da deformação permanente que surge na superfície dos pavimentos. Um dos motivos a ser destacado, mesmo em estruturas bem projetadas e misturas asfálticas bem dosadas, é o aumento da carga de roda e, também, o aumento da pressão de inflação dos pneumáticos (MOURA, 2010).

Segundo MOURA (2010), os principais fatores que contribuem, de forma isolada ou em conjunto, diretamente para a deformação permanente de camadas asfálticas em trilha de roda são:

- a) Teor de ligante asfáltico acima do teor ótimo de projeto;
- b) Emprego de ligante asfáltico com consistência inadequada às temperaturas da região onde a mistura asfáltica é utilizada;
- c) Distribuição granulométrica inadequada, incluindo a presença de porcentagens excessivas da fração areia (areia lavada);
- d) Forma e textura superficial de agregados inadequados;
- e) Excesso de carga, comum em rodovias;
- f) Temperatura;

- g) Grau de compactação das misturas asfálticas; e
- h) Tráfego canalizado.

O afundamento da trilha de roda não só reduz a vida de serviço do pavimento, como também afeta o nível de conforto do usuário, principalmente a manobra dos veículos, comprometendo a segurança da via (FONTES *et al.*, 2010). Basicamente, uma compactação adequada e uma criteriosa seleção dos materiais podem evitar esse fenômeno.

FONTES *et al.* (2010) observou em seu estudo que submetendo o pavimento a temperaturas elevadas, o cimento asfáltico tende a fluir mais fácil em decorrência da diminuição natural de viscosidade associada a essas condições climáticas. Essa situação origina uma mistura asfáltica “mais mole”, a qual é mais propensa ao afundamento.

MAHMOUD e BAHIA (2004) conseguiram sintetizar os efeitos na resistência ao afundamento de trilha de roda (ATR) com a variação dos diversos fatores associados às misturas asfálticas apresentados na TAB. 2.5.

TAB. 2.5 Fatores que afetam o ATR nos revestimentos asfálticos.

	FATOR	VARIAÇÃO	RESISTÊNCIA AO ATR
Agregados	Textura superficial	Lisa para rugosa	Aumento
	Granulometria	Descontínua para densa	Aumento
	Forma	Arredondada para angular	Aumento
	Tamanho	Aumento no DMN	Aumento
Ligante	Rigidez	Aumento	Aumento
Mistura	Teor de ligante	Aumento	Redução
	Porcentagem de vazios	Aumento	Redução
	VAM	Aumento	Redução
	Energia de compactação	Aumento	Aumento
Condições de campo	Temperatura	Aumento	Redução
	Estado de tensões/deformações	Aumento na pressão dos pneus	Redução
	Repetições de carga	Aumento	Redução
	Água	Aumento	Redução se a mistura for sensível à água

Fonte: MAHMOUD e BAHIA, (2004).

Assim, para um melhor entendimento, será abordado a seguir o papel de cada constituinte da mistura asfáltica (ligante asfáltico, agregados e volumetria) no fenômeno da deformação permanente.

### 2.5.1 LIGANTE ASFÁLTICO

O asfalto ou CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo), utilizado em pavimentação, é obtido através da destilação do petróleo em refinaria. É um material que possui grande quantidade de hidrocarbonetos não voláteis pesados (betumes) (BALAGUER, 2012).

Segundo NASCIMENTO (2015), o CAP apresenta características intrínsecas que o diferencia dos demais materiais de construção. Ele é um material viscoelástico, que se comporta como material semissólido quando submetido a baixas temperaturas e se apresenta como material líquido em temperaturas elevadas.

Existem algumas razões nas quais esse tipo de asfalto seja largamente utilizado em pavimentação. Dentre elas, podem ser citadas como principais:

- Possibilita forte união dos agregados, agindo como um ligante que permite flexibilidade controlável;
- Boa aderência aos agregados;
- Propriedade impermeabilizante; e
- Insolúvel em água.

Vários estudos têm indicado a importância do ligante asfáltico no desempenho da mistura quanto à deformação permanente. O teor de asfalto na mistura, a viscosidade e a modificação dos mesmos são alguns fatores que têm ligação direta com o desempenho da mistura asfáltica relacionado à deformação permanente. De maneira geral, ligantes menos viscosos tornam a mistura menos rígida e mais propensa ao acúmulo de deformações plásticas. Alguns modificadores de ligante atuam exatamente nessa característica, principalmente para aumentar a viscosidade do ligante nas altas temperaturas, sem a perda de desempenho nas temperaturas mais baixas (NASCIMENTO, 2008).

Quanto à deformação permanente, o ligante apresenta menor resistência no início de sua vida de serviço, quando sua rigidez é menor, sendo afetado também pelas altas temperaturas e por veículos trafegando à baixa velocidade com cargas elevadas (CAVALCANTI, 2010).

Um estudo feito por KAMEL e MILLER (1994) indicou que um teor de asfalto excessivo pode levar o revestimento a problemas de estabilidade. Por outro lado, baixos teores de asfalto comprometem a durabilidade do material em termos de fadiga e envelhecimento precoce, além de tornar a mistura asfáltica segregável e de difícil aplicação, com baixa trabalhabilidade.

De acordo com SEBAALY (1997), o teor de asfalto pode ser mais importante do que a granulometria na definição do desempenho global de misturas asfálticas. Contudo, vale lembrar que esse teor é também fortemente dependente da granulometria, da origem dos agregados, da metodologia de dosagem adotada e da energia de compactação.

O teor de ligante asfáltico presente na mistura está diretamente ligado à deformação permanente. Apesar de não haver uma proporcionalidade precisa entre essas variáveis, existe o risco da ocorrência do fenômeno em estudo com o aumento do teor de ligante adicionado à mistura. Nesse caso, a espessura do filme asfáltico no entorno dos agregados se eleva ao ponto de interferir na resistência ao cisalhamento resultante do atrito entre os grãos pétreos (MOURA, 2010).

## 2.5.2 AGREGADOS

Os agregados representam em torno de 95% em peso e 70 a 85% em volume de toda a mistura asfáltica e contribuem de maneira significativa para o desempenho da mesma. Suas características influenciam diretamente nas propriedades de rigidez e resistência ao cisalhamento.

As características dos agregados podem ser definidas em função de três propriedades principais a forma, a angularidade e a textura superficial (MASAD *et al.*, 2005; SUKHWANI *et al.*, 2006; KIM e SOUZA, 2009; BESSA *et al.*, 2009, 2011). Estas características das partículas 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).

Algumas pesquisas (GOUVEIA, 2002; AL-ROUSAN, 2004; MASAD *et al.*, 2005; BESSA, 2012) investigaram as características físicas dos agregados para distinguir os diferentes aspectos que constituem estes materiais. A forma é composta pelas variações nas proporções do grão. Já o conjunto de variações sobrepostas à forma, nos contornos da partícula, é designado angularidade. A textura é representada pelas irregularidades na superfície da partícula, em escala muito pequena, de forma a não influenciar as duas primeiras propriedades em suas totalidades.

Estas mesmas fontes afirmam que as partículas de agregados adequadas para o uso em misturas asfálticas devem ser aproximadamente cúbicas ao invés de chatas ou alongadas. Após a compactação, partículas mais angulares exibem maior travamento e atrito interno do que partículas arredondadas, o que resulta em maior estabilidade mecânica.

NASCIMENTO (2015) apresenta que as misturas contendo partículas arredondadas têm melhor trabalhabilidade e requerem menores energias de compactação para atingirem a densidade exigida. Esta facilidade de compactação, entretanto, não é necessariamente uma vantagem, uma vez que as misturas poderão continuar se densificando com as cargas do tráfego, levando ao ATR em função de baixos teores de vazios e de fluência plástica.

Observa-se, também, que misturas asfálticas projetados com quantidades elevadas de areias naturais ou agregados não britados têm baixa estabilidade e são susceptíveis a grandes afundamentos (ROBERTS *et al.*, 1996).

As partículas achatadas e alongadas (*flat and elongated, F&E*) são indesejáveis nas misturas asfálticas, já que elas tendem a quebrar durante o processo construtivo e sob a aplicação das cargas dos veículos (BUCHANAN, 2000).

BROSSEAUD *et al.* (1993) estudaram os efeitos de alguns componentes nas misturas asfálticas que interferem nos afundamentos. As seguintes conclusões foram apresentadas:

a) A redução da fração areia natural implica diretamente na redução da deformação permanente do tipo trilha de roda nas misturas asfálticas;

b) A utilização de agregados britados, ao invés de seixos naturais, melhora sistematicamente a resistência à deformação permanente; e

c) A introdução de uma descontinuidade na distribuição granulométrica pode ocasionar instabilidade quanto à deformação permanente se não for estudada em detalhes.

De acordo com STAKSTON (2002), a granulometria e a angularidade são as propriedades dos agregados que mais influenciam o comportamento das misturas. Nesse mesmo sentido, pode-se considerar que, em geral, misturas preparadas com agregados angulosos (obtidos por britagem) possuem suscetibilidade às deformações permanentes menores e maior estabilidade quando comparadas com misturas de mesma composição e granulometria, porém compostas por agregados arredondados (seixo rolado) (UGE e VAN DE LOO, 1974 *apud* NASCIMENTO, 2008).

Essas características (forma, angularidade e textura), tradicionalmente, são obtidas de maneira indireta e apresentam resultados combinados de duas ou mais propriedades, além de serem realizados por meio de ensaios dispendiosos e/ou incompletos, que não caracterizam as três propriedades com um único equipamento.

Assim, CASTELO BRANCO *et al.* (2007) utilizaram o método denominado *Aggregate Imaging System* (AIMS) para essa caracterização, constatando a grande versatilidade da técnica e sua potencialidade para analisar com muita rapidez características importantes dos agregados. Vários outros autores (BESSA, 2012; SANTOS, 2013; PAZOS 2015) já utilizaram essa técnica de análise das características dos agregados.

Além das propriedades minerais, a composição granulométrica dos agregados é diversificada para mitigar os efeitos do ATR. Comumente, para essa finalidade, são empregadas misturas asfálticas descontínuas. Quando corretamente compactadas, essas misturas têm maior número de pontos de contato entre partículas graúdas do que misturas densas (ou contínuas) (NASCIMENTO, 2008).

A distribuição granulométrica em misturas asfálticas é responsável pelo embricamento ou entrosamento dos agregados, de maneira que os agregados menores ocupem os vazios deixados pelos agregados maiores (MOMM, 1998).

Portanto, seria intuitivo pensar que uma mistura contendo um esqueleto pétreo de granulometria próxima a uma idealizada densidade máxima, comporia uma mistura asfáltica com um comportamento superior. Porém, apesar de haver um melhor empacotamento dos agregados nessa situação, o percentual de vazios do agregado mineral (VAM) seria insignificante, impossibilitando a existência de espaço mínimo necessário à incorporação de ligante asfáltico, tornando a mistura muito sensível às pequenas variações de teor de ligante (NASCIMENTO, 2008).

Segundo BERNUCCI *et al.* (2010), vários investigadores propuseram faixas granulométricas para a densidade máxima, porém a mais conhecida é a curva de Fuller, que é apresentada pela expressão denotada na EQ. 2.1.

$$P = 100 \left( \frac{d}{D} \right)^n \quad \text{EQ. 2.1}$$

Onde:

P = Porcentagem de material que passa na peneira de diâmetro  $d$ ;

$d$  = Diâmetro da peneira em questão; e

D = Tamanho máximo do agregado, definido como uma peneira acima do tamanho nominal máximo, sendo este último definido como o tamanho da peneira maior que a primeira peneira que retém mais que 10% de material.

O número  $n$  estudado por Fuller que resultou em uma granulometria de máxima densidade era igual a 0,5. Entretanto, na década de 1960, após estudos realizados a *Federal Highway Administration* dos Estados Unidos adotou o expoente como 0,45 (BERNUCCI *et al.*, 2010).

No estudo da influência de várias graduações pétreas no comportamento quanto à deformação permanente em simuladores de tráfego, HAND *et al.* (2001) mostraram que é possível obter resultados satisfatórios utilizando-se curvas granulométricas passando acima, através e abaixo da extinta zona de restrição (ZR), que era proposta pela metodologia *Superpave*.

Alguns testes realizados em simulador de laboratório sugeriram que as curvas passando acima e através da ZR oferecem ligeiramente uma maior resistência à deformação do que a da curva que passa abaixo da ZR. Nesse mesmo sentido, KIM *et al.* (2009) também concluíram que a ZR não é um fator que afeta a resistência ao

ATR em pavimentos de baixo volume de tráfego, assim como já havia sido pesquisado para pavimentos de alto volume de tráfego.

## 2.6 PROCESSAMENTO DAS CURVAS DE COMPACTAÇÃO GIRATÓRIA

Uma vez que o uso do Compactador Giratório *Superpave* (CGS) se tornou o componente principal da atual metodologia de dosagem do SHRP, e que seu uso atualmente é amplamente entendido, torna-se desejável a sua utilização para a obtenção de propriedades mecânicas de misturas asfálticas. Assim, acredita-se que uma correta interpretação dos dados oriundos da compactação giratória possa levar ao estabelecimento de parâmetros, que possam servir de suplemento à atual dosagem puramente volumétrica. Vários trabalhos têm sido feitos nesta ótica (MAHMOUD e BAHIA, 2004).

BAHIA *et al.* (1998) reavaliaram a metodologia de dosagem *Superpave*. Este estudo apontou que a interpretação dos resultados do CGS (% $G_{mm}$  em  $N_{ini}$  e  $N_{max}$ ), com a consideração do desempenho em função do tráfego de veículos, não levava em conta adequadamente a trabalhabilidade das misturas. Acredita-se que os dados oriundos do CGS, inicialmente propostos, estão sendo subutilizados nos procedimentos de dosagem, sendo este fato um dos motivadores das pesquisas atuais com o uso do CGS.

Segundo ONOFRE *et al.* (2011) uma das vantagens da utilização da metodologia de dosagem *Superpave* é a obtenção de um gráfico de compactação que correlaciona a densidade aparente da mistura (expressa em percentual da densidade máxima medida –  $G_{mm}$ ) a cada giro de compactação com o respectivo número de giro. O estágio imediato de compactação pode fornecer diretamente o Volume de vazios ( $V_v$ ) na mistura.

Assim, foram propostos alguns índices oriundos das curvas de compactação giratória, tais como os utilizados por MAHMOUD e BAHIA (2004), entre eles o *Compaction Densification Index* (CDI), *Traffic Densification Index* (TDI), *Compaction Force Index* (CFI), *Traffic Force Index* (TFI), entre outros parâmetros utilizados por outros autores para melhor definir um projeto de mistura asfáltica.

Inserido neste universo, NASCIMENTO (2008) descreve alguns destes índices e sugeriu alguns valores de comparação entre os resultados dos ensaios com os tipos de vias nas quais as misturas poderiam ser utilizadas. Nesta pesquisa, utilizaram estes valores como parâmetros de comportamento das misturas para que fosse possível compará-las.

Durante a compactação dos corpos de prova pelo CGS, a cada giro é registrada a altura do CP, possibilitando o cálculo do volume do mesmo, o qual juntamente com a massa da amostra, permite estimar a densidade ao longo da compactação, segundo a EQ. 2.2.

$$G_{mb(estimada)} = \frac{W_m/V_{mx}}{\gamma_w} \quad \text{EQ. 2.2}$$

Onde:

$G_{mb(estimada)}$ : Densidade específica aparente estimada durante a compactação;

$W_m$ : Massa do CP, gramas;

$V_{mx}$  : Volume do CP calculado a partir do diâmetro interno do molde (150 mm) e a altura medida pelo SGC em um determinado giro; e

$\gamma_w$  : Massa específica da água.

Este cálculo assume que o CP tem uma forma cilíndrica perfeita, o que não é verdade, uma vez que as irregularidades superficiais levam a um volume levemente inferior ao considerado no cálculo, influenciando no valor da densidade específica aparente estimada.

A densidade estimada é corrigida pela relação entre a densidade medida por pesagem hidrostática (AASHTO T 116 - 13) e a densidade estimada no  $N_{des}$ , ou seja, ao final da compactação. Tal relação é conhecida como fator de correção e representada pela EQ. 2.3.

$$C = \frac{G_{mb(medida)}}{G_{mb(estimada)}} \quad \text{EQ. 2.3}$$

Onde:

$C$  : Fator de correção;

$G_{mb(medida)}$  : Densidade específica aparente medida após  $N_{des}$ ;

$G_{mb(estimada)}$  : Densidade específica aparente estimada em  $N_{des}$ ;

Tendo-se o fator de correção ao final da compactação, o mesmo é aplicado para os outros giros, obtendo-se desta forma a densidade corrigida em qualquer momento da compactação e determina-se a porcentagem da  $G_{mm}$  em qualquer giro da compactação conforme a EQ. 2.4.

$$\%G_{mm} = 100 * \frac{G_{mb(corrigida)}}{G_{mm}} \quad \text{EQ. 2.4}$$

Após a determinação da  $\%G_{mm}$  ao longo do processo de compactação, pode-se fazer um gráfico em função do número de giros, obtendo-se a curva de densificação do CP.

As variáveis CDI e TDI são obtidas a partir dos dados extraídos da curva de compactação do CGS. CDI é definido como o valor da área entre três curvas: (i) a de compactação, (ii) a reta horizontal que cruza a curva de compactação quando do oitavo giro e (iii) a reta vertical que cruza com a curva de compactação quando a densidade é equivalente a 92% da  $G_{mm}$ .

Já o TDI é o valor da área entre as seguintes curvas: (i) a de compactação, (ii) a reta horizontal em que se observa 92% da  $G_{mm}$  e (iii) a reta vertical que cruza a curva de compactação quando a densidade aparente é equivalente a 98% da  $G_{mm}$ .

Há casos em que algumas misturas possuem baixos percentuais de ligante, ou até um alto percentual de agregados graúdos, que impossibilita a determinação do TDI visto que é necessário atingir 98% da  $G_{mm}$  da mistura. Neste caso, pode ser utilizado o TDI modificado (TDIm), que é o valor da área entre as seguintes curvas: (i) a de compactação, (ii) a reta horizontal em que se observa 92% da  $G_{mm}$  e (iii) a reta vertical que cruza a curva de compactação quando a densidade aparente é equivalente a 96% da  $G_{mm}$ . A FIG. 2.8 mostra o TDIm, além do CDI e do TDI.

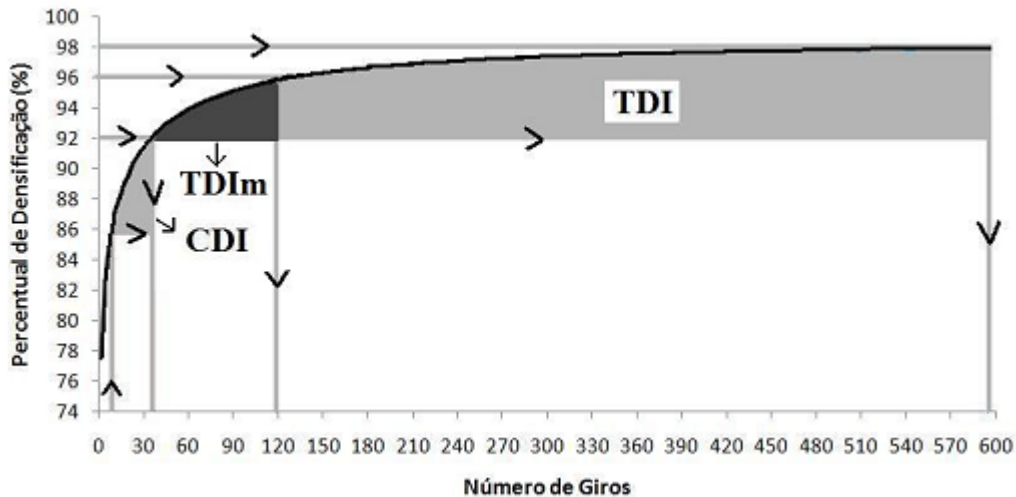


FIG. 2.8 Determinação do CDI, TDI e TDIIm a partir da curva do CGS.

Fonte: ONOFRE, (2011).

NASCIMENTO (2008) relatou que o TDIIm, assim como o TDI, apresenta boas correlações com outros resultados de ensaios de deformação permanente, podendo ser utilizado como parâmetro para a determinação da resistência à deformação permanente.

Para o cálculo destas áreas é utilizado a técnica da retangularização, ou seja, divide-se a área total sob a curva em vários retângulos com um giro de largura, este procedimento está descrito por NASCIMENTO (2008).

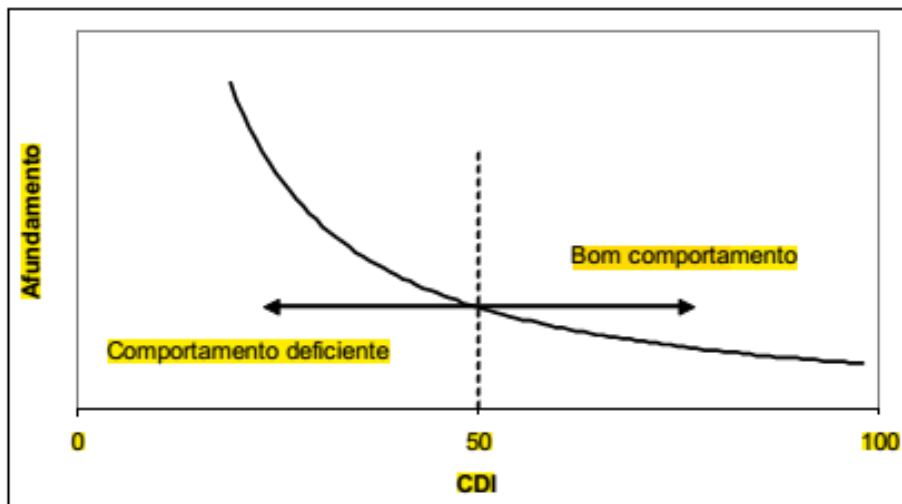


FIG. 2.9 Esquema do uso do CDI como parâmetro de dosagem com o CGS.

Fonte: NASCIMENTO, (2008).

A deformação permanente das misturas com o esqueleto pétreo de menor CDI foi maior do que a das misturas de maior CDI, ou seja, a estabilidade das misturas asfálticas está primordialmente associada ao esqueleto pétreo (CDI), dependendo pouco do ligante asfáltico utilizado por NASCIMENTO (2008). A FIG. 2.9 ilustra esta situação.

NASCIMENTO (2008) recomenda os seguintes critérios para a dosagem de misturas asfálticas densas utilizadas como camada de revestimento em rodovias brasileiras:

a. Tráfego Médio:

- CDI > 50;
- TDI > 250;
- FN a 60°C (204 kPa) > 300 ciclos.

b. Tráfego Pesado:

- CDI > 50;
- TDI > 400;
- FN a 60°C (204 kPa) > 750 ciclos.

Outro parâmetro derivado da curva de compactação é o *Locking Point*, que traduzido por NASCIMENTO (2008) é Ponto de Travamento dos Agregados (PTA). Este foi desenvolvido pelo *Illinois Department of Transportation*, como uma alternativa ao Ndes para prevenir a supercompactação de misturas asfálticas e a subsequente degradação do esqueleto pétreo durante a compactação giratória (PROWELL e BROWN, 2007).

Este departamento definia como sendo o giro onde o esqueleto pétreo se intertrava, a partir do qual a compactação resulta em degradação dos agregados e pouca densificação adicional, estando relacionado com o processo construtivo de campo.

Este conceito foi desenvolvido a partir da comparação de dados de misturas Marshall e *Superpave* com as observações das respectivas compactações em campo, coletados durante 3 anos.

VAVRIK e CARPENTER (1998) refinaram essa definição, onde este ponto passou a ser o primeiro giro de uma sequência de 3 giros de mesma altura,



precedido por 2 pares de giros de mesma altura, porém o primeiro par 0,1mm maior do que o *Locking Point* e o segundo 0,1mm maior do que o primeiro, ou seja, 0,2mm maior do que o *Locking Point*. Na FIG. 2.10 este conceito é ilustrado esquematicamente.

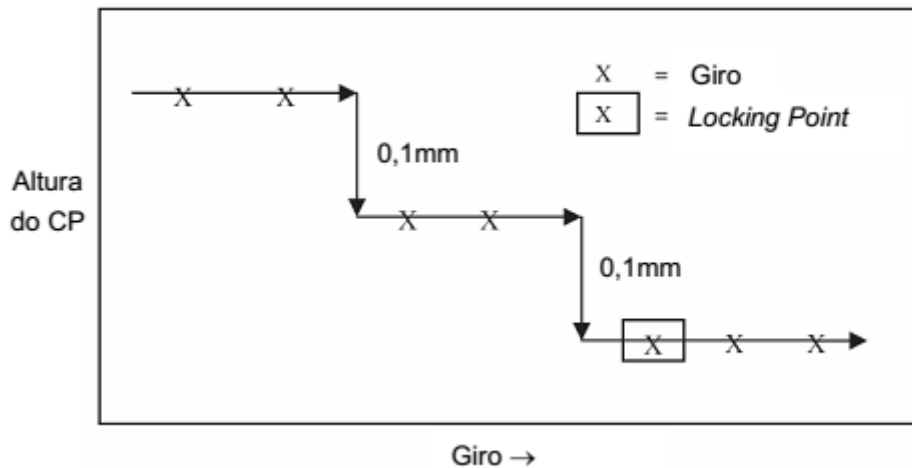


FIG. 2.10 Esquema representativo do PTA.

Fonte: VAVRIK e CARPENTER, (1998).

VAVRIK e CARPENTER (1998) sugeriram a avaliação da compactação giratória baseada no *Locking Point*, consideração também feita pelo *Georgia Department of Transportation*, nos Estados Unidos, onde este conceito é usado nos seus projetos de dosagem, reportando valores aceitáveis na faixa de 60 a 90 giros.

## 2.7 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS MISTURAS

As características morfológicas das partículas dos agregados influenciam de forma importante no comportamento global de misturas asfálticas e em consequência a sua resistência ao dano. Existem alguns ensaios disponíveis na literatura para a caracterização mecânica de misturas e que podem ser usados para quantificar os efeitos das propriedades dos agregados no seu desempenho.

De acordo com BAHIA e FAHEEM (2007), uma limitação da dosagem *Superpave* é que ela considera apenas parâmetros volumétricos na definição do

projeto da mistura. Contudo, são as propriedades mecânicas que estão mais relacionadas com o desempenho dos revestimentos asfálticos, fato pelo qual foram desenvolvidos diferentes tipos de testes para caracterizar o seu comportamento em termos de deformação permanente.

Nesta seção serão listados e discutidos alguns dos ensaios de relevância, sugeridos na literatura, e que foram conduzidos nesta pesquisa.

### 2.7.1 ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Segundo a norma DNIT 135/2010 - ME o módulo de resiliência (MR) de uma mistura asfáltica é a relação entre tensão de tração ( $\sigma_\tau$ ), aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica de mistura asfáltica e a deformação específica recuperável ( $\varepsilon_\tau$ ) correspondente à tensão aplicada, conforme a EQ. 2.5. No Brasil, o teste de MR também é padronizado pela norma ABNT NBR 16018 (2011).

$$MR = \left( \frac{\sigma_\tau}{\varepsilon_\tau} \right) \quad \text{EQ. 2.5}$$

A ABNT NBR 16018 (2011) descreve os procedimentos para a obtenção dos deslocamentos utilizados para o cálculo do MR, além de apresentar recomendações para a obtenção do coeficiente de Poisson.

Para a caracterização do MR, aplicam-se cargas repetidas em uma frequência de 1 Hz (carregamento de 0,1 s e repouso de 0,9 s) no plano diametral vertical de corpos de prova cilíndricos medindo  $101,6 \pm 3,8$  mm em diâmetro e entre 35 e 70 mm em altura, em testes de compressão diametral, a uma temperatura de  $25,0 \pm 0,5$  °C. Esta carga gera uma tensão de tração transversal ao plano de aplicação da carga e sensores LVDT (*Linear Variable Differentia Transformer*) medem a deformação diametral recuperável na direção correspondente à tensão gerada (deslocamento horizontal).

Este ensaio é um dos testes mais populares usados para a caracterização da mistura na avaliação de estruturas de pavimentos nos Estados Unidos e no Brasil. A

principal razão para esta popularidade é que as amostras ou testemunhas extraídas do campo podem ser testadas diretamente no laboratório (WITCZAK *et al.*, 2002).

Segundo PONTE *et al.* (2013) a análise dos resultados de MR não permite uma modelagem apropriada dos fenômenos comumente associados aos pavimentos, por não considerar o seu comportamento viscoelástico. Porém, este ainda é o parâmetro de rigidez mais difundido no país, devido tanto à cultura de utilização desse parâmetro quanto ao alto valor de aquisição de equipamentos para obtenção do módulo dinâmico.

A FIG. 2.11 mostra um esquema representativo do carregamento diametral e do correspondente estado biaxial de EQ. 2.6.

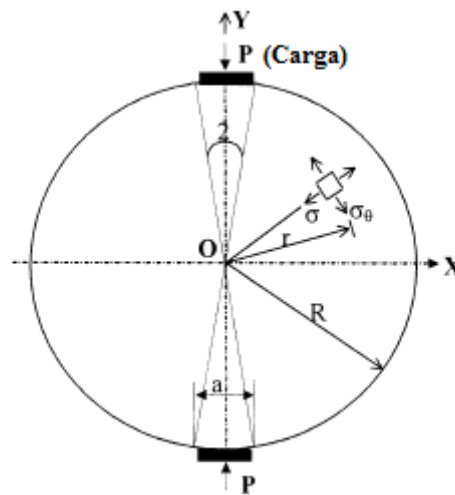


FIG. 2.11 Esquema de carregamento no ensaio de MR

Fonte: WITCZAK *et al.*, (2002).

$$\varepsilon_x = \frac{1}{MR} (\sigma_x - \mu \sigma_y) \quad \text{EQ. 2.6}$$

Onde:

$\varepsilon_x$ : Deformação de tração no diâmetro;

$\sigma_x$ : Tensão horizontal;

$\sigma_y$ : Tensão vertical;

$\mu$ : Coeficiente de Poisson; e

$MR$ : Módulo de resiliência.

Nas misturas asfálticas, o coeficiente de Poisson pode ser considerado independente do tipo de carregamento, variando apenas com a temperatura. No Brasil, é comum assumir o valor de 0,30 para esta propriedade a 25°C (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Posto isto, o valor do módulo de resiliência pode ser definido pela EQ. 2.7 para um diâmetro de aproximadamente 10 cm, conforme orientado na norma do DNIT 135/2010 - ME.

$$MR = \frac{F}{100\Delta H} (0,9976\mu + 0,2692) \quad \text{EQ. 2.7}$$

Onde:

MR: Módulo de resiliência, em MPa;

F: Carga vertical repetida aplicada diametralmente no corpo de prova, em N;

$\Delta$ : Deformação elástica ou resiliente para aplicação da carga (F), em cm;

H: Altura do corpo de prova, em cm; e

$\mu$ : Coeficiente de Poisson.

Nesta pesquisa, o procedimento adotado foi baseado na norma ABNT NBR 16018 (2011), que sugere a aplicação de vários níveis de carga com magnitudes inferiores a 30% da resistência à tração do material. Para o cálculo do módulo de resiliência, a média de resultados de testes de pelo menos três corpos de prova foi calculada.

## 2.7.2 ENSAIO DE VIDA DE FADIGA

A fadiga ocorre por meio de ações mecânicas e/ou térmicas que não parecem críticas isoladamente, se comparadas à resistência sob carregamento monotônico, mas na realidade são determinantes para a vida útil do pavimento (BERNUCCI *et al.*, 2010).

No Brasil, utiliza-se comumente para determinação da vida de fadiga o ensaio de compressão diametral à tensão controlada. A simplicidade do ensaio, tanto na execução quanto na preparação das amostras, faz com que ele seja muito utilizado em todo o mundo. As amostras podem ser preparadas com o uso do soquete Marshall ou extraídas da pista. O ensaio tem boa repetibilidade e reprodutibilidade, além de ser comercialmente viável e experimentalmente sensível.

Este ensaio tem sido realizado no país, geralmente com tensão e temperatura controladas, utilizando uma frequência de 60 aplicações por minuto com 0,1 segundos de duração do carregamento repetido e descanso de 0,9 segundos. Para cada mistura ensaiada, determinam-se as relações entre o número de repetições à ruptura e o nível de tensões atuantes. A deformação aumenta até a ruptura completa do corpo de prova.

Para a obtenção da curva de fadiga, grupos de amostras são submetidos a diferentes níveis de tensão até a ruptura por fadiga. Os resultados obtidos em ensaios podem ser expressos pelos seguintes modelos, sob o regime de diferença de tensões (EQ. 2.8) ou deformação controladas: (EQ. 2.9).

$$N_f = k_1 \left( \frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{n_1} \quad \text{EQ. 2.8}$$

Onde:

$N_f$ : Número de solicitações para que ocorra a ruptura da amostra;

$\Delta\sigma$ : Diferença algébrica entre as tensões vertical (de compressão) e horizontal (de tração) no centro da amostra; e

$k_1$  e  $n_1$ : Parâmetros de fadiga determinados em laboratório.

$$N_f = k_2 \left( \frac{1}{\Delta\varepsilon_i} \right)^{n_2} \quad \text{EQ. 2.9}$$

Onde:

$N_f$ : Número de solicitações para que ocorra a ruptura da amostra;

$\Delta\varepsilon_i$ : Diferença de deformação, medida no centro da amostra; e

$k_2$  e  $n_2$ : Parâmetros de fadiga determinados em laboratório.

No caso dos modelos de representação por diferença de tensões, “n” (inclinação da curva) indica a suscetibilidade ao estado de tensões, ou seja, maiores valores de “n” indicam maior sensibilidade do comportamento à fadiga das misturas em relação às mudanças na diferença de tensões.

Segundo MAGALHÃES (2004), essa maior suscetibilidade se reflete no maior risco de a mistura sofrer trincamento prematuro devido a erros de projeto ou construtivos, significando que pequenas variações nas espessuras das camadas podem acarretar redução expressiva na vida de fadiga da estrutura.

PAZOS (2015) afirma que quando os módulos de resiliência de misturas são semelhantes pode-se realizar a comparação entre os resultados das curvas de fadiga destas misturas. No entanto, é importante notar que o comportamento à fadiga das misturas deveria ser comparado considerando características de toda a estrutura do pavimento e das relações modulares entre as suas camadas.

### 2.7.3 ENSAIO UNIAXIAL DE CARGA REPETIDA

Os procedimentos deste ensaio são apresentados no *Report 465* (WITCZAK *et al.*, 2002) e descritos de forma geral segundo NASCIMENTO (2008). Consiste em submeter à mistura asfáltica a um carregamento cíclico de compressão uniaxial e a deformação permanente acumulada é obtida em função do número de ciclos. Segundo o *Report 465* (WITCZAK *et al.*, 2002), o *Flow Number* é o parâmetro oriundo do ensaio uniaxial de carga repetida que melhor se relaciona com a deformação permanente.

O ciclo de carregamento aplicado no ensaio consiste de um pulso *haversine* de 0,1 s seguido por um repouso de 0,9 s, similar ao dos ensaios de módulo resiliente de misturas asfálticas. A carga máxima do ensaio ( $P_{max}$ ) é de 1,6 kN, que para corpos de prova medindo 100 mm em diâmetro resulta em uma tensão de 204 kPa. A carga de contato ( $P_{cont}$ ) é definida como 5% da  $P_{max}$ , ou seja, 80 N, como ilustrado na FIG. 2.12.

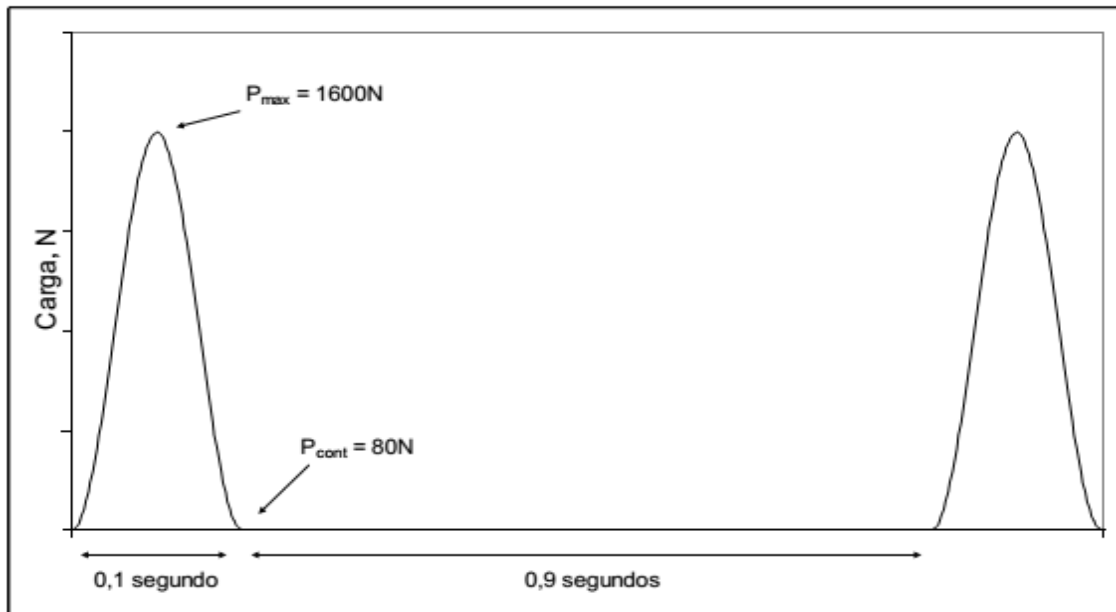


FIG. 2.12 Carregamento aplicado no ensaio uniaxial de carga repetida a 60°C.

Fonte: NASCIMENTO, (2008).

A EQ. 2.10 mostra o cálculo de deformação plástica ao longo do ensaio.

$$\varepsilon_p = \frac{\Delta L_N}{G_L} \quad \text{EQ. 2.10}$$

Onde:

$\varepsilon_p$ : Deformação plástica acumulada em um ciclo N, em microstrains;

$\Delta L_N$ : Deslocamento axial coletado ao final do repouso do ciclo N, em mm; e

$G_L$ : Comprimento de medida do deslocamento=100 mm.

Similarmente ao ensaio de *creep* (uniaxial estático), a deformação permanente acumulada ( $\varepsilon_p$ ) pode ser dividida em três zonas: primária, secundária e terciária. No entanto, o número de ciclos onde começa o estágio terciário (cisalhamento com volume constante) é referido como *Flow Number* (FN) (NASCIMENTO, 2008). Esses estágios podem ser visualizados na FIG. 2.13, segundo ZHANG *et al.* (2013).

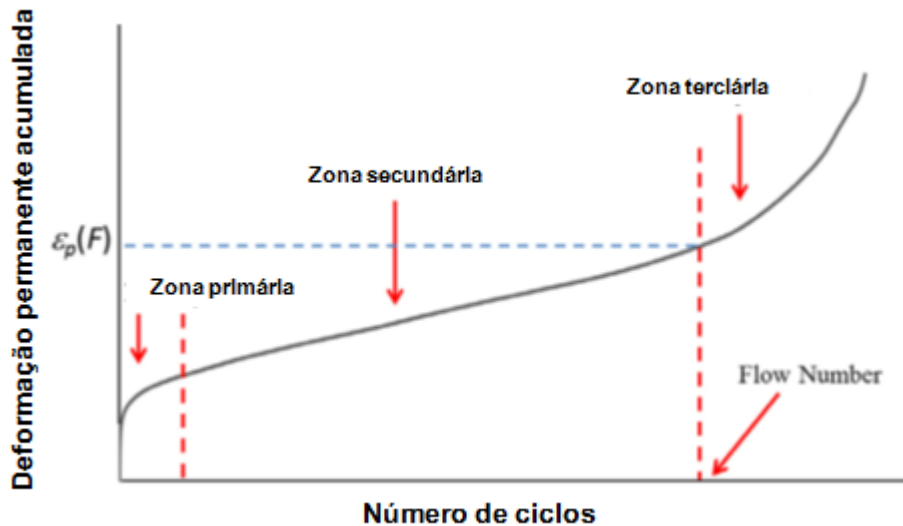


FIG. 2.13 Gráfico Deformação permanente acumulada versus Nciclos.

Fonte: ZHANG *et al.*, (2013).

A zona secundária também pode ser descrita em modelo de potência, gerando os coeficientes “a” e “b” que atuam sobre o número de ciclos realizados pelo ensaio (N) para a modelagem da deformação plástica acumulada ( $\epsilon_p$ ), conforme FIG. 2.14 a seguir.

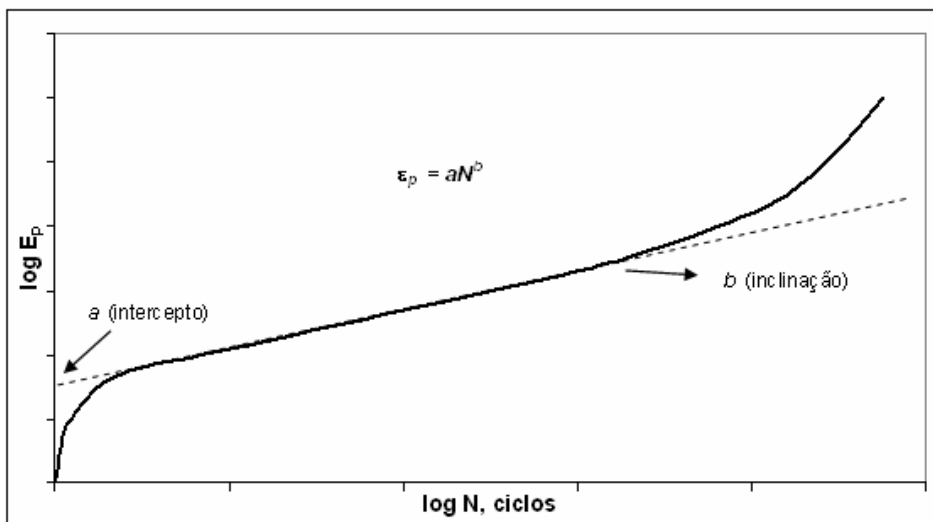


FIG. 2.14 Deformação plástica ( $\epsilon_p$ ) acumulada em função do número de ciclos

Fonte: WITCZAK *et al.*, (2002).

A FIG. 2.15 ilustra os gráficos da  $\epsilon_p$  e da taxa de deformação plástica, ambas versus o número de ciclos, de um ensaio típico de FN realizado por (NASCIMENTO, 2008). O FN está associado ao ciclo onde a taxa de deformação plástica é mínima.



A partir deste ciclo o CP entra na zona terciária, ou melhor, atinge a ruptura passando a sofrer cisalhamento a volume constante (WITCZAK et al., 2002).

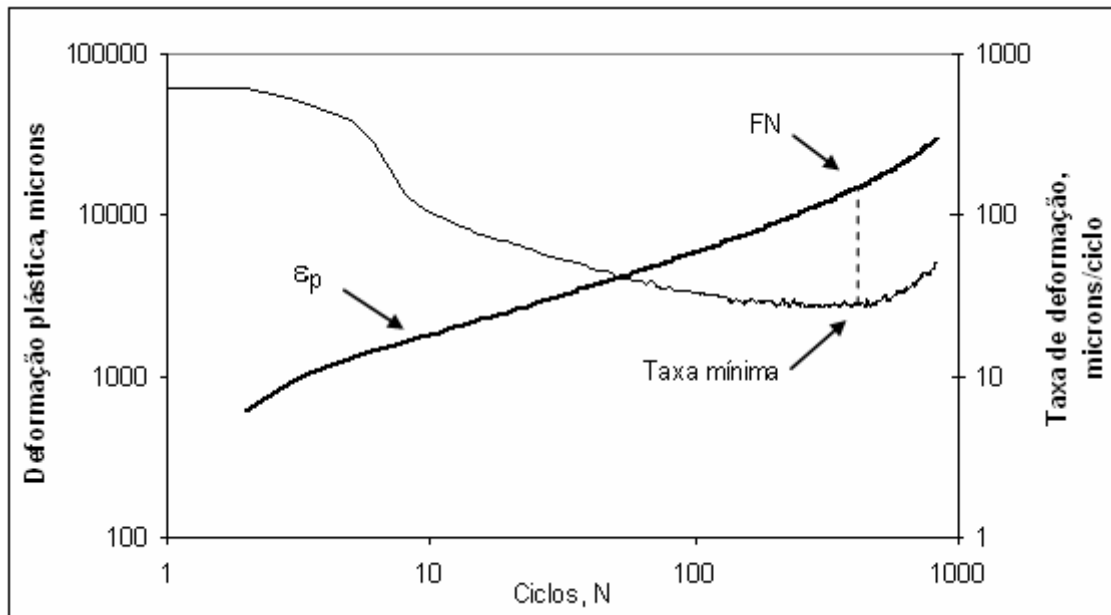


FIG. 2.15 Gráfico deformação plástica e taxa de deformação no ensaio de FN.

Fonte: NASCIMENTO, (2008).

NASCIMENTO (2008) definiu a taxa mínima a partir de modelo linear, com isto, a taxa  $b$  foi obtida da curva  $\epsilon_p$  versus número de ciclos, sendo a inclinação de uma reta coincidente com a curva no ciclo 10 e no FN. Definiu-se o décimo ciclo por este sempre estar inserido no começo da zona secundária (percepção gráfica); e o FN por ser o limite teórico entre as zonas secundária e terciária. A EQ. 2.11 define o cálculo de  $b$ .

$$b = \frac{\epsilon_{pFN} - \epsilon_{p10}}{FN - 10} \quad \text{EQ. 2.11}$$

Onde:

$b$  : Taxa de deformação na zona secundária, microstrains/ciclo;

$\epsilon_{pFN}$  : Deformação plástica no FN, microstrains; e

$\epsilon_{p10}$  : Deformação plástica no ciclo 10, microstrains.

#### 2.7.4 PERDA POR UMIDADE INDUZIDA

O teste de sensibilidade à ação deletéria da água mais usado no Brasil segue o procedimento descrito em AASHTO T 283-14, baseado no trabalho de R.P. Lottman (NCHRP Project 4-08), e um trabalho posterior realizado por D.G. Tunnicliff e R.E. Root (NCHRP Project 10-17) (MOURA, 2001 apud. BERNUCCI, 2010).

Esta é a última etapa de dimensionamento Nível 1 do método *Superpave*. Usa-se o ensaio conhecido como Lottman (AASHTO T 283-14) “Resistência ao dano pela umidade induzida em misturas betuminosas compactadas” onde se identifica qual a combinação asfalto/agregado é sensível à umidade e mede-se a eficiência de agentes melhoradores de adesividade, se usados.

Como resultado deste ensaio se obtém no caso de misturas contínuas, o valor mínimo de RRT para que a amostra seja aprovada, sendo o de 70%. Para as misturas SMA, o limite mínimo para RRT também tem sido adotado de 70% segundo a especificação AASHTO MP 8-01.

Segundo BERNUCCI (2010) os resultados de pesquisa indicam que o ensaio de adesividade realizado para agregados graúdos isoladamente (DNER-ME 078/94) não garante que a mistura irá apresentar bom comportamento à ação deletéria da água, mesmo quando os agregados apresentam resultados satisfatórios. O ensaio de dano por umidade induzida em corpo de prova de mistura asfáltica compactada foi normalizado recentemente pela ABNT através da norma ABNT NBR 15617:2015.

#### 2.8 AVALIAÇÃO ECONÔMICA DE PROJETOS

Segundo RODRIGUES (2011) a área de pesquisa em pavimentos asfálticos é especialmente interessante porque tem caráter multidisciplinar. Logo, profissionais de algumas áreas muito distintas podem agregar importante valor ao estudo de pavimentos, em especial ao estudo de materiais de pavimentação.

Segundo a Organização das Nações Unidas (1984) um projeto é um empreendimento planejado que consiste num conjunto de atividades inter-relacionadas e coordenadas para alcançar objetivos específicos dentro dos limites de um orçamento e de um período de tempo dados.

ABECASSIS e CABRAL (2000) classificam os projetos em dois tipos: os diretamente produtivos e os não diretamente produtivos. Essa distinção se faz necessária pelo método analítico de preparação e avaliação de projetos utilizados para cada um dos tipos indicados.

Os diretamente produtivos são os que visam à criação, renovação ou expansão de atividades de produção de bens ou serviços susceptíveis à venda. Já os projetos não diretamente produtivos visam à criação, renovação ou expansão de atividades de suporte às atividades produtivas ou se destinam a melhorar a vida individual ou coletiva.

Segundo RODRIGUES (2011) os projetos com objetivo de resolver problemas de pavimentação sem estar prevista a cobrança de pedágio são projetos não diretamente produtivos, como é o caso em geral dos projetos de infraestrutura de transportes. São ainda projetos nos quais não é possível estabelecer individualmente seu preço e no seu modo de produção intervêm outros fatores que não os componentes do seu custo industrial, comercial e encargos.

A avaliação de projetos é uma ferramenta que permite tomar decisões, isto é, ajuda a determinar como utilizar os recursos disponíveis da melhor forma possível, sendo que esta análise tem algumas vertentes distintas que se complementam: a técnica, a econômica, a financeira e a social. Após um investimento ter sua viabilidade técnica aprovada, passa por uma análise que irá definir seu mérito econômico, financeiro e social.

Segundo BUARQUE (1991), a avaliação financeira determina o mérito do projeto do ponto de vista do empresário; a avaliação econômica engloba os impactos do projeto para a sociedade como um todo e a avaliação social incorpora o ponto de vista da distribuição de renda e das consequências do projeto sobre a renda social. Essa diferença entre viabilidade econômica e social não será levada em conta, no presente trabalho, devido ser fundamental estimar apenas o ganho da sociedade como um todo e ser de difícil quantificação o ganho de um projeto sobre a distribuição de renda.

CONTADOR (2010) afirma que, usualmente, considera-se a viabilidade de um projeto como de interesse apenas do investidor e, em alguns poucos casos, também

do agente financeiro que depende da capacidade de pagamento do empresário para recuperar os fundos emprestados.

### 2.8.1 CUSTOS E COMPOSIÇÃO DE CUSTOS

Custo refere-se ao valor pelo qual é obtido um bem ou um serviço, sendo considerado, quando existir, consumo ou aplicação de um determinado insumo. Por outro lado, toda despesa realizada com um equipamento comprado é, em função de seu uso, um custo, tendo em vista a deterioração do bem, havendo, conseqüentemente, um consumo.

Tem-se que o custo total é representado pelo somatório dos custos diretos de utilização de equipamentos, materiais e mão-de-obra, necessários para a realização de um determinado serviço, acrescidos dos impostos e demais custos indiretos e do lucro do empreendedor.

Portanto, para a definição do custo unitário de um serviço é necessário o conhecimento do seu sistema de produção, levando-se em consideração os tipos de equipamentos, os materiais e a mão-de-obra que são necessários para a realização do mesmo. Deve-se observar que o desconhecimento da tecnologia da produção pode conduzir ao cálculo inapropriado dos custos unitários de construção.

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT) tem um método para o cálculo dos custos dos serviços ligados ao sistema rodoviário chamado de Sistema de Custo Rodoviário (SICRO 2) que é atualizado periodicamente, no qual é apresentado os custos dos serviços ligados a este modal por região do país, servindo de referência para orçamentação de obras no Brasil.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

No presente capítulo está descrita a metodologia empregada nesta dissertação, que enfoca a utilização do resíduo do beneficiamento do minério de ferro na pavimentação asfáltica. É apresentada ainda uma descrição dos ensaios a que estes materiais foram submetidos. Além disto, mostra-se a caracterização básica de todo o material utilizado nesta pesquisa e a dosagem das misturas pelos dois métodos abordados neste estudo.

#### 3.1 METODOLOGIA EMPREGADA

Tendo em vista os objetivos propostos para a realização deste trabalho de mestrado, a metodologia empregada consistiu, num primeiro momento, na caracterização do referido material. Após esta etapa, foram feitas as dosagens das misturas asfálticas utilizando os compactadores Marshall e o compactador giratório *Superpave* (CGS). O trabalho foi balizado pela aplicação do resíduo em mistura asfáltica a ser empregada em revestimentos rodoviários, utilizando as normatizações do Departamento de Infraestrutura de Transporte (DNIT) e da *American Association of State Highway and Transportation Official* (AASHTO).

Para a realização das misturas, utilizaram-se agregados graúdos de origem gnaiss-granítica britados (brita 1 e brita 0), agregado miúdo (Areia) ambos proveniente do estado do Rio de Janeiro - RJ e o resíduo proveniente da empresa Samarco Mineração S.A, situada no município de Mariana - MG, na região do Quadrilátero Ferrífero. Esse material é gerado na etapa de flotação do beneficiamento do minério de ferro na mina de Mariana, MG e depositado na barragem de Germano. Todos os materiais foram submetidos a uma avaliação completa de suas propriedades físicas, químicas e mecânicas, visando sua aplicação em pavimentação.

Com os agregados e o resíduo devidamente caracterizados, os mesmos foram combinados em 3 misturas enquadrados na faixa C do DNIT de Concreto Asfáltico (CA).

Neste trabalho, tais misturas foram denominadas como se segue:

- Mistura 1: contendo Brita 1, Brita 0 e Areia;
- Mistura 2: contendo Brita 1, Brita 0 e Resíduo; e
- Mistura 3: contendo Brita 1, Brita 0, Areia e Resíduo.

Com a granulometria das misturas definidas, realizou-se a dosagem pelo método Marshall obtendo o teor de projeto de cada uma delas, o próximo passo consistiu na realização dos ensaios previstos na norma do DNIT.

Procedeu-se os ensaios mecânicos de Módulo de Resiliência e Vida de Fadiga nas misturas para comparação do comportamento das mesmas. Com esses dados foi possível realizar uma simulação do comportamento das misturas e, para isto, foi utilizado o programa SisPav 2007.

Após esta fase, selecionou-se as composições granulométricas e o teor de projeto definido pelo método Marshall das misturas 1 e 2, as quais foram utilizadas para a definição do teor de projeto utilizando o compactador giratório *Superpave* (CGS). Com a definição do novo teor de projeto foi possível obter os índices da curva de compactação de cada mistura, fez-se ainda os ensaios mecânicos de carga repetida a 60°C para determinação do *Flow Number* (FN) e da taxa de deformação na zona secundária (b), além do ensaio de perda por umidade induzida. Com esses resultados foi possível verificar o comportamento do esqueleto pétreo das misturas.

Com os resultados das dosagens obtidas usando o compactador Marshall e o compactador giratório *Superpave*, sob o ponto de vista convencional de uma dosagem volumétrica, foram comparados os teores de projeto de ligante e as propriedades volumétricas das misturas.

A organização das etapas do trabalho experimental encontra-se representada no fluxograma da FIG. 3.1.

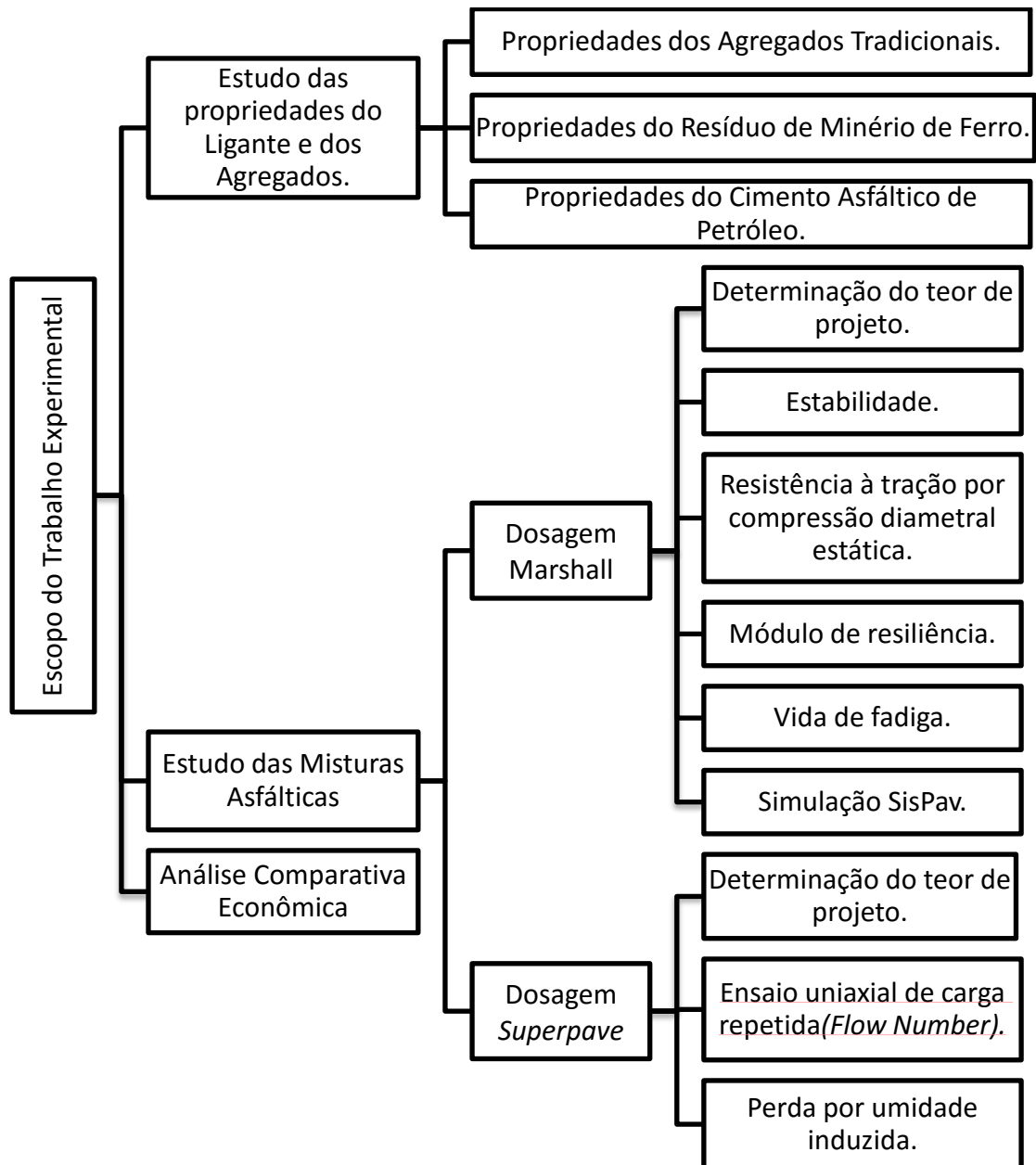


FIG. 3.1 Etapas do trabalho experimental desta pesquisa.

Para a realização de todas as etapas descritas, foi necessária a moldagem de 185 corpos de prova, distribuídos conforme a TAB. 3.1.

TAB. 3.1 Quantitativo de corpos de prova empregados por etapa.

ENSAIOS	Corpo de Prova (diâmetro x altura)	QUANTIDADE DE CPs	
		MARSHALL	SUPERPAVE
1) Definição do Teor Ótimo	10cm x 6cm	80	20
2) Estabilidade	10cm x 6cm	9	-
3) Módulo de Resiliência (25°C)	10cm x 6cm	15	-
4) Resistência à tração indireta (25°C)	10cm x 6cm	9	-
5) Vida de Fadiga (TC)	10cm x 6cm	30	-
6) <i>Flow Number</i> (60° C) - CP com Vv 7%	10cm x 15cm	-	10
7) Perda por umidade induzida - CP com Vv 7%	10cm x 6cm	-	12
<b>TOTAL</b>		<b>185</b>	

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS E DO RESÍDUO

Na TAB. 3.2 está apresentada a lista dos ensaios realizados para caracterizar os agregados minerais e o resíduo, bem como as metodologias adotadas como referência, as quais seguiram as normas vigentes do DNIT e da AASHTO.

TAB. 3.2 Ensaios de caracterização dos agregados.

PROPRIEDADES	METODOLOGIA
Análise Granulométrica	DNER-ME 083/98
Perda por abrasão Los Angeles	DNER-ME 035/98
Perda ao choque no aparelho Treton	DNER-ME 399/99
Determinação da absorção e da densidade do agregado graúdo	DNER-ME 081/98
Densidade real do agregado miúdo	DNER-ME 084/95
Adesividade a ligante betuminoso	DNER-ME 078/94
Durabilidade	DNER-ME 089/94
Equivalente areia	DNER-ME 054/97
AIMS	CASTELO BRANCO <i>et al.</i> (2007)
Angularidade graúdo e miúdo	AASHTO T304



Os ensaios para determinação das massas específicas, equivalente de areia e absorção foram realizados utilizando-se os agregados na sua granulometria original, apenas separando os agregados graúdos dos miúdos (miúdos = material passante na peneira de abertura 4,75mm). Entretanto, para a realização dos ensaios de abrasão Los Angeles e Treton utilizou-se as granulometrias específicas, uma vez que estes métodos especificam graduações padronizadas.

As características de forma, angularidade e textura dos agregados graúdos foram obtidas pelo método AIMS. O equipamento utilizado para a realização deste procedimento pertence à COPPE/UFRJ e é ilustrada na FIG. 3.2.

O método AIMS ainda não está padronizado nas normas da AASHTO ou ASTM, porém diversos trabalhos disponíveis na literatura têm indicado boa representatividade das diferentes propriedades de agregados medidas pelo sistema. (MAHMOUD, 2005; MASAD *et al.*, 2005; ARAGÃO, 2007; BESSA *et al.*, 2011, 2012; PAZOS, 2015).



FIG. 3.2 Equipamento AIMS utilizado na pesquisa.

Para a realização deste ensaio, é necessária uma quantidade mínima de partículas por peneira, a qual é sugerida pelo manual do equipamento e indicadas na TAB. 3.3. No entanto, por segurança, as amostras testadas nesta pesquisa contiveram mais partículas do que o mínimo sugerido pelo manual do equipamento.

TAB. 3.3 Quantidades mínimas de partículas para ensaios no sistema AIMS.

TAMANHO DA PENEIRA	NÚMERO DE PARTÍCULAS SUGERIDAS
19,0 mm (3/4")	50
12,5 mm (1/2")	50
9,5 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

Fonte: Manual do equipamento.

Durante os ensaios, as partículas de agregados foram posicionadas nas ranhuras de bandejas circulares específicas para cada tamanho, como mostrado na FIG. 3.3.



FIG. 3.3 Agregados dispostos nas bandejas circulares do equipamento AIMS.

Depois do alinhamento das partículas nas bandejas, a câmera de alta resolução e o sistema de iluminação do equipamento é usada para capturar as imagens dos agregados. Cabe dizer que as partículas em contato umas com as outras não são avaliadas na análise, pois o sistema AIMS tem um algoritmo que desconsidera estas partículas para evitar que sejam interpretadas pelo sistema como uma única e, assim, apresente propriedades muito diferentes das demais.

Os resultados de forma obtidos deste procedimento foram confrontados com os parâmetros presentes na especificação de dosagem *Superpave* da norma AASHTO M323-13, porém esta, só menciona a relação 1:5 para esta característica.

Em complemento às especificações referentes aos agregados, foi realizado o ensaio de Vazios sem Compactação (AASHTO T304 - método C), onde se obtém a angularidade de todos os agregados utilizados na pesquisa.

### 3.3 LIGANTE ASFÁLTICO

Em relação aos ligantes optou-se pela utilização de um CAP 50/70, fornecido diretamente pela BR Distribuidora S.A. As amostras foram submetidas aos ensaios de caracterização previstos pela ANP (2005) e norma DNIT 095/2006 - EM, descritos na TAB. 3.4. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Ligantes e Misturas Betuminosas do IME.

TAB. 3.4 Lista dos ensaios de caracterização do CAP, utilizado nesta pesquisa.

ENSAIOS	LIMITES	NORMAS
<i>AMOSTRA VIRGEM</i>		
Penetração @100g, 5s, 25°C (0,1mm)	50 a 70	DNIT 155/2010-ME
Ponto de amolecimento (°C)	mín 46	DNIT 131/2010-ME
a 135°C, SP 21, 20 rpm	mín 274	
Viscosidade Brookfield (cP) a 150°C, SP 21, 50 rpm	mín 112	NBR 15184:2004
a 177°C, SP 21, 100 rpm	57-285	
Índice de susceptibilidade térmica	-1,5 a +0,7	
Ponto de fulgor (°C)	mín 235	DNER-ME 148/94
Solubilidade em tricloroetileno	mín 99,5%	NBR 14855:2015
Massa específica e densidade relativa, 25°C	-	NBR 6296:2012
Ductilidade @25°C (cm)	mín 60	DNER-ME 163/98
<i>APÓS RTFOT @163°C, 85min</i>		
Varição em massa	máx 0,5%	ASTM D 2872
Ductilidade @25°C (cm)	mín 20	DNER-ME 163/98
Aumento do ponto de amolecimento (°C)	máx 8	DNIT 131/2010-ME
Penetração retida	mín 55%	DNIT 155/2010-ME

A partir dos resultados do ensaio de viscosidade realizado no equipamento *Brookfield* (FIG. 3.4), foi possível traçar a curva de viscosidade e temperatura para a obtenção das faixas ideais de mistura e de compactação dos corpos de prova, utilizados nos dois métodos de dosagem.



FIG. 3.4 Equipamento *Brookfield* utilizado nesta pesquisa.

### 3.4 DOSAGENS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Após o processo de caracterização dos materiais e, com a finalidade de dosar e realizar ensaios mecânicos, foram selecionadas três misturas asfálticas preparadas pelo do método Marshall e duas pelo método *Superpave*. Ainda, com o intuito de simplificar e facilitar a compreensão do leitor em relação às nomenclaturas adotadas para as misturas dos agregados, as composições serão designadas por letras e números, sendo descritas na TAB. 3.5.

TAB. 3.5 Nomenclatura das misturas asfálticas utilizadas nesta pesquisa

DESCRIÇÃO	COMPOSIÇÃO
M1	Brita 1, Brita 0 e Areia
M2	Brita 1, Brita 0 e Resíduo
M3	Brita 1, Brita 0, Resíduo e Areia

Uma representação esquemática das misturas está ilustrada na FIG. 3.5. O volume das provetas foi completado com os materiais utilizados na pesquisa, de tal forma que, as proporções volumétricas de cada um dos agregados que compõem cada uma das misturas foi respeitada.



FIG. 3.5 Representação esquemática das misturas testadas nesta pesquisa.

Todas as três misturas foram dosadas segundo o método Marshall; duas destas (M1 e M2) também foram utilizadas na dosagem pelo método *Superpave* para fins comparativos. Quanto aos agregados, suas temperaturas foram tomadas como 10°C acima das temperaturas dos ligantes, determinadas nos ensaios de caracterização.

A faixa granulométrica escolhida para as misturas foi a faixa C do DNIT, conforme a especificação DNIT 031/2006 - ES, independente do método utilizado para dosá-las.

As curvas granulométricas foram plotadas em gráficos com escala logarítmica para a abertura das peneiras no método Marshall. Além da faixa de projeto, foram plotados também, as faixas correspondentes aos limites inferior e superior da faixa C, como referência. Para o método *Superpave* a curva granulométrica foi feita com as aberturas das peneiras elevadas à potência 0,45. Assim, é possível visualizar a linha de densificação máxima e os pontos de controle previstos pela norma AASHTO M323-13.

### 3.4.1 DOSAGEM SEGUNDO O MÉTODO MARSHALL

Com as curvas granulométricas das misturas e o ligante definido, procedeu-se a realização das dosagens das misturas pelo método Marshall, utilizando as instalações do Laboratório de Ligantes e Misturas Betuminosas do IME.

As dosagens com o compactador Marshall foram realizadas aplicando-se 75 golpes por face nos corpos-de-prova, seguindo procedimentos indicados pela norma brasileira DNER - ME 043/95.

Os corpos de prova foram compactados com soquete manual, obedecendo às temperaturas de mistura e compactação definidas pela curva de viscosidade versus temperatura.

Os parâmetros de dosagem de cada teor de ligante estipulado foram obtidos pela média dos resultados de cinco corpos de prova. Foram utilizados cinco teores de ligante por mistura para a dosagem, com exceção da mistura M1, que precisou de seis teores, tendo em vista que, o valor de teor de projeto encontrado foi próximo ao maior teor testado inicialmente.

Os critérios adotados para a definição do teor ótimo de ligante estão indicados na TAB. 3.6. Tais parâmetros de referência foram adotados conforme a norma DNIT 031/2006 - ES.

TAB. 3.6 Parâmetros de referência da dosagem Marshall desta pesquisa.

CARACTERÍSTICAS	MÉTODO DE ENSAIO	CAMADA DE ROLAMENTO
Porcentagem de vazios, %	DNER-ME 043/95	3 a 5
Relação betume/vazios	DNER-ME 043/95	75 - 82
Estabilidade, mínima, (kgf) (75 golpes)	DNER-ME 043/95	500
Resistência à Tração por Compressão Diametral estática a 25°C, mínima, MPa	DNIT 136/2010 - ME	0,65

Fonte: DNIT 031/2006 – ES.

Além desses parâmetros, foi verificada também a relação de vazios do agregado mineral (VAM), apresentados na TAB. 3.7 a seguir, conforme a norma DNIT 031/2006 - ES.

TAB. 3.7 Parâmetros de referência da dosagem Marshall para VAM.

VAM – VAZIOS DO AGREGADO MINERAL		
TAMANHO NOMINAL MÁXIMO DO AGREGADO		VAM MÍNIMO
#	Mm	%
1 ½"	38,1	13
1"	25,1	14
¾"	19,1	15
½"	12,7	16
3/8"	9,5	18

Fonte: DNIT 031/2006 – ES.

Após a determinação dos teores de projeto de cada mistura realizou-se os ensaios mecânicos em cada mistura para a comparação dos resultados.

### 3.4.2 DOSAGEM SEGUNDO O MÉTODO SUPERPAVE

A dosagem com a metodologia *Superpave* se resume na determinação das proporções de ligante asfáltico e agregados que gerem propriedades volumétricas, tais como volume de vazios, vazios no agregado mineral, vazios preenchidos com ligante e relação fíler/asfalto, com valores dentro de limites pré-estabelecidos.

Todos os procedimentos executados para a definição do teor por essa metodologia foram efetuados no Laboratório de Misturas Asfálticas da COPPE/UFRJ.

Os corpos de prova foram moldados com 100 giros (Ndes), seguindo recomendações da norma AASHTO M 323-13 e as suas dimensões foram: diâmetro de 100 mm e altura de aproximadamente 60mm. De acordo com a especificação AASHTO R 35-15, este Ndes é aplicado para tráfegos de médio a pesado, em

rodovias urbanas, intermunicipais e interestaduais, com Número de giros inicial (Nini) de 8 giros e número máximo de giros (Nmax) de 160 giros.

O compactador giratório *Superpave* (CGS) utilizado para a moldagem dos corpos de prova é da marca ELE Servopac apresentado na FIG. 3.6, com sistema de carga eletro-pneumático.



FIG. 3.6 Compactador giratório *Superpave* (CGS) COPPE/UFRJ.

Todas as misturas preparadas para dosagem foram feitas manualmente, em bacias metálicas sobrepostas em chapa quente. Para simular o envelhecimento de curto prazo das misturas, as amostras não compactadas permaneceram em uma estufa por 2 horas, na temperatura de compactação. Após este período, as misturas foram colocadas em moldes pré-aquecidos para o processo de compactação a uma pressão de 600 kPa.

Parte da mistura solta foi usada para a determinação da massa específica máxima medida (ou massa específica Rice) ( $G_{mm}$ ), seguindo a norma ASTM D2041.

Para o cálculo do fator de correção, o qual relaciona a densidade aparente estimada em função da altura e do diâmetro do corpo de prova ( $G_{mb(estimada)}$ ) e a densidade aparente real ( $G_{mb(medida)}$ ), foi adotado o limite de 160 giros.



Após a determinação do teor ótimo de ligante, mais dois corpos de prova foram moldados, para cada mistura, até o  $N_{max}$  de 160 giros para a definição dos parâmetros das curvas de compactação e verificação dos critérios de aceitação da mistura, conforme a norma AASHTO M 323-13.

Com as propriedades físicas dos agregados e das misturas asfálticas, foram calculados os seguintes parâmetros volumétricos dos corpos de prova: porcentagem de vazios com ar ( $V_a$ ), vazios no agregado mineral (VAM), relação betume-vazios (RBV), relação pó-betume efetivo (RPB) e porcentagem da densidade máxima em Nini ( $\%G_{mm}@N_{ini}$ ).

Os resultados dos corpos de prova de mesmo teor foram processados estatisticamente, fornecendo valores médios das propriedades volumétricas, utilizados para a montagem das curvas de dosagem e determinação dos teores de projeto de ligante. Na TAB 3.8 estão os requisitos da dosagem com o compactador giratório, segundo AASHTO M323-13.

TAB. 3.8 Requisitos volumétricos da dosagem *Superpave*.

TRÁFEGO, N AASHTO $\times 10^6$	DENSIDADE RELATIVA REQUERIDA, $\%G_{mm}$			VAZIOS DO AGREGADO MINERAL (VAM), % MÍNIMA						RELAÇÃO BETUME- VAZIOS (RBV), %	RELAÇÃO PÓ- BETUME EFETIVO (RPB),%
				TAMANHO MÁXIMO NOMINAL (TMN), (mm)							
	Nini	Ndes	Nmáx	37,5	25,0	19,0	12,5	9,5	4,75		
< 0,3	$\leq 91,5$	96,0	$\leq 98,0$	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	70 – 80	0,6 – 1,2
0,3 a 3	$\leq 90,5$	96,0	$\leq 98,0$	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	65 – 78	0,6 – 1,2
3 a 10	$\leq 89,0$	96,0	$\leq 98,0$	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	65 – 75	0,6 – 1,2
10 a 30	$\leq 89,0$	96,0	$\leq 98,0$	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	65 – 75	0,6 – 1,2
> 30	$\leq 89,0$	96,0	$\leq 98,0$	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	65 – 75	0,6 – 1,2

Fonte: AASHTO M323.-13.

A partir das curvas de densificação dos CPs de cada mistura, foram calculados os índices CDI, TDI e PTA, conforme NASCIMENTO (2008) e ONOFRE *et al.* (2011). Os índices CDI e TDI foram calculados segundo a definição de MAHMOUD e BAHIA (2004), descrita em NASCIMENTO (2008). Na TAB. 3.9, os limites inicial e final da curva de densificação utilizados para o cálculo dos índices CDI e TDI são apresentados.

TAB. 3.9 Limites da curva de densificação considerados.

ÍNDICES	LIMITE INICIAL	LIMITE FINAL
CDI	Giro 8 (Nini)	92% da Gmm
TDI	92% da Gmm	98% da Gmm

Além desses foi calculado também o *Locking Point* (PTA). Este parâmetro foi obtido adotando o procedimento definido por VAVRIK e CARPENTER (1998).

### 3.5 ENSAIOS MECÂNICOS

Os ensaios mecânicos foram divididos em dois grandes grupos: ensaios realizados em misturas dosadas pelo método Marshall e os ensaios realizados em misturas compactadas pelo método *Superpave*. Os procedimentos adotados para cada um deles serão descritos as seguir.

#### 3.5.1 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

O ensaio de módulo de resiliência (MR) foi realizado em corpos de prova moldados segundo a metodologia Marshall. Este ensaio foi realizado nas instalações do Laboratório de Ligantes e Misturas Betuminosas do IME, utilizando equipamento automatizado (FIG. 3.7) que mede a deformação elástica do CP durante o carregamento cíclico imposto por um sistema pneumático de carregamento.

A temperatura adotada para o ensaio foi de 25°C, com condicionamento prévio dos CPs de duas horas. O cálculo do MR seguiu as disposições da norma DNIT 135/2010 – ME.

Para cada uma das três misturas, foram compactados cinco corpos de prova (CP) pelo método Marshall para a realização deste ensaio. Como resultado do ensaio, têm-se uma média de 03 valores de módulo para cada um dos CP de cada mistura e a média dos 5 CPs dá o valor de MR daquela mistura.

Para esta pesquisa, optou-se por utilizar os resultados de módulo de cada corpo de prova agrupado em um único universo, acarretando com isso 15 valores de MR para cada mistura, e que, após tratamento estatístico, geraram um valor médio de módulo de resiliência.



FIG. 3.7 Equipamento para ensaio de MR do IME, utilizado nesta pesquisa.

### 3.5.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO ESTÁTICA

Para a realização deste ensaio, foram utilizados três corpos de prova de cada uma das três misturas dosadas pelo método Marshall. As misturas foram submetidas ao ensaio de determinação da resistência à tração por compressão diametral, seguindo as diretrizes indicadas na norma DNIT 136/2010 - ME. O procedimento foi realizado no Laboratório de Ligantes e Misturas Betuminosas do IME com o equipamento da FIG. 3.8.

O ensaio se dá pela aplicação de um esforço compressivo no plano diametral vertical de corpos de prova cilíndricos medindo 100 mm em diâmetro e entre 30 mm e 70 mm em altura, na taxa de  $0,8 \pm 0,1$  mm/s. Tal deformação gera tensões de tração perpendiculares a este diâmetro, quando estas tensões se igualam a tensão máxima admissível do material levam as amostras à ruptura. Esta resistência à ruptura é conhecida por resistência à tração indireta. O pico de carga resultante da aplicação do deslocamento diametral é determinado durante os ensaios para o cálculo da resistência à tração.

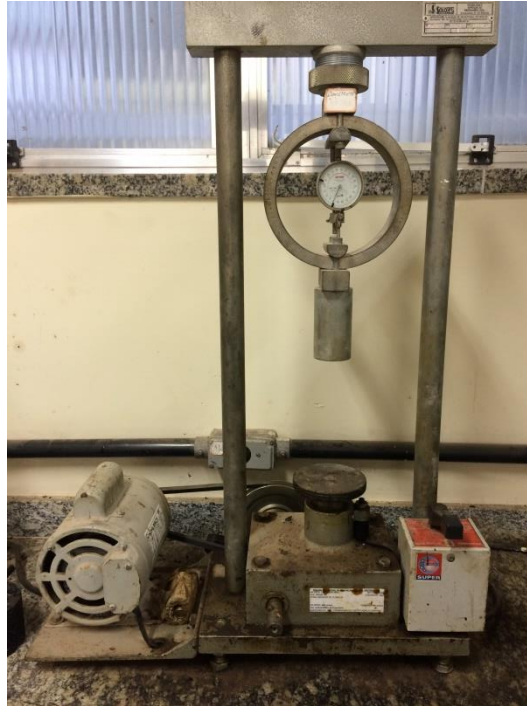


FIG. 3.8 Equipamento de ensaio RT, utilizado nesta pesquisa.

### 3.5.3 VIDA DE FADIGA

No Brasil, os ensaios de vida de fadiga são tipicamente realizados à tensão e temperatura controladas, usando o mesmo equipamento do teste de módulo de resiliência. Ciclos de carga são aplicados em uma frequência de 1 Hz (carregamento de 0,1 s e repouso de 0,9 s) em testes de tração indireta em amostras medindo 100 mm em diâmetro e entre 35 mm e 70 mm em altura. A amplitude da carga vertical é mantida constante durante o teste até a ruptura do corpo de prova.

Para esta pesquisa, todas as três misturas confeccionadas pelo método Marshall foram submetidas ao ensaio de vida de fadiga à tensão controlada (TC). O procedimento foi realizado no Laboratório de Ligantes e Misturas Betuminosas do IME com o equipamento ilustrado na FIG. 3.9, o qual aplica carregamentos cíclicos de compressão diametral com frequência de 1 Hz em corpos de prova a 25°C. No próprio equipamento existe um contador de pulsos para determinar o número de carregamentos sofrido pelo CP até sua ruptura.

Com o intuito de caracterizar mecanicamente as misturas asfálticas foram ensaiados dez corpos de prova por mistura. Para a determinação da vida de fadiga

foram utilizados cinco níveis de tensão: 10%, 20%, 30%, 40% e 45% da resistência à tração indireta (RT). Com esses pares de pontos foi possível traçar a curva de log de diferença de tensão x número de aplicações. E de posse do valor médio do MR da mistura, também foi plotado o gráfico de log da deformação específica resiliente x número de aplicações.



FIG. 3.9 Equipamento para ensaio de fadiga do IME, utilizado nesta pesquisa.

#### 3.5.4 ENSAIO UNIAXIAL DE CARGAS REPETIDAS

Como resultado dos ensaios uniaxiais de carga repetida obteve-se o valor do *Flow Number* (FN) e a Taxa de Deformação na zona secundária (b), realizados segundo procedimentos descritos por NASCIMENTO (2008), no equipamento ilustrado na FIG. 3.10 do laboratório da COPPE/UFRJ.



FIG. 3.10 Equipamento do ensaio de cargas repetidas de FN.

Para os testes de *Flow Number*, foram confeccionados cinco corpos de prova para cada mistura utilizada na dosagem *Superpave*, sendo que os dois primeiros utilizados para a calibração do equipamento de compactação e o restante para a realização do ensaio. Estes CPs foram compactados pelo CGS, em dimensão de 100 mm de diâmetro e aproximadamente 150 mm em altura e o volume de vazios de  $7,0 \pm 0,5\%$ . Nota-se que, seguindo recomendações de ROBINETTE e WILLIAMS (2006), os corpos de prova foram compactados na geometria de ensaio, sem extração dos seus núcleos ou serragem dos seus extremos.

A FIG. 3.11 mostra os corpos de prova após a realização do ensaio de *Flow Number*.



FIG. 3.11 Corpo de prova após o ensaio de *Flow Number* com 7% Vv.

Durante os testes, os corpos de prova foram acondicionados à temperatura de 60°C durante no mínimo duas horas antes do ensaio.

Após este período, os CPs foram submetidos a um carregamento de carga repetida, similar ao dos ensaios de módulo de resiliência de misturas asfálticas. O tempo de aplicação da carga foi de 0,1 segundo com período de repouso de 0,9 segundos. A carga máxima do ensaio foi de 1.600 N, que para os CPs de 100mm de diâmetro resultou na tensão de 204kPa. A carga de contato foi 5% da carga máxima, ou seja, 80 N. Os deslocamentos verticais resultantes foram monitorados por dois LVDTs montados nos corpos de prova (WITCZAK *et al.*, 2002; NASCIMENTO, 2008).

À medida que o equipamento realizava a medição das deformações, os sinais eram processados em computador para o monitoramento da deformação permanente acumulada em cada ciclo.

### 3.5.5 PERDA POR UMIDADE INDUZIDA

Este ensaio é considerado complementar dentro da metodologia *Superpave*. Para a realização do mesmo foram confeccionados seis corpos de prova de cada uma das misturas utilizadas na dosagem *Superpave*. Utilizou-se os equipamentos da COPPE/UFRJ e adotou-se o procedimento preconizado na norma AASHTO T283-89.

São confeccionados dois subgrupos de três corpos de prova com teor de vazios na faixa de 6 a 8% (7% ideal). Um subgrupo é condicionado à vácuo para garantir uma saturação com grau de umidade entre 55 e 80%. Em seguida foi aplicado um ciclo de aproximadamente 16 horas de congelamento, após este período foi realizado um condicionamento de 24 horas em água quente a 60°C dos CPs. Por fim o subgrupo que já foi condicionado e o que não foi, são ensaiados à resistência à tração indireta.

O resultado final é a razão entre as médias dos valores de RT dos dois subgrupos.

### 3.6 ANÁLISE COMPARATIVA ECONÔMICA

Para esta pesquisa foi realizado um estudo comparativo de custo utilizando a composição padrão de Concreto Asfáltico (CA) apresentada pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT) no seu Sistema de Custo Rodoviário (SICRO 2) no mês de referência Julho de 2015 para a região de Minas Gerais e uma composição feita com a utilização do Resíduo na confecção do mesmo serviço.

Para isso, é apresentada a composição do custo do resíduo em m<sup>3</sup>km e considerou-se que todos os materiais utilizados nas composições são postos na usina de asfalto. No preço do Cimento Asfáltico de Petróleo considerou apenas o custo da aquisição, apresentado pela ANP, não sendo computado o custo do transporte deste da refinaria até a usina.

Com a utilização das composições foi possível verificar a distância máxima de utilização do resíduo na qual o custo do mesmo se iguala ao da areia convencional, a distância máxima de instalação da usina de asfalto onde o custo da tonelada do CBUQ com resíduo se igual ao padrão do SICRO2 e a quantidade estimada de massa de CBUQ com resíduo que poderá ser produzida em 1 dia de exploração do minério de ferro.



## 3.7 MATERIAIS EMPREGADOS

### 3.7.1 RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DO MINÉRIO DE FERRO

O resíduo do beneficiamento de minério de ferro utilizado nesta pesquisa é proveniente da empresa Samarco Mineração S.A, situada no município de Mariana-MG, região do Quadrilátero Ferrífero. Este material é caracterizado pela fração arenosa proveniente da etapa de flotação no beneficiamento do minério de ferro, depositado na barragem de Germano. Na FIG. 3.12 é apresentada uma vista geral da barragem em 24 de outubro de 2014, à época da coleta da amostra deste estudo.



FIG. 3.12 Vista da Barragem de Germano.

Fonte: Antônio Guimarães, (2014).

As amostras foram retiradas a uma distância de 50 metros da crista do barramento, com espaçamento entre pontos de coleta de 100 metros, num total de três furos. Na FIG. 3.13 é possível verificar as características do material retirado. Devido à proximidade da linha freática, determinou-se uma profundidade de 2,0 metros para a retirada das amostras. Este material foi acondicionada em tambores plásticos de aproximadamente 80,0 kg cada, evitando com isso a contaminação do mesmo durante o transporte e futuro depósito.



FIG. 3.13 Ponto de coleta de amostras do resíduo usado nesta pesquisa.

Fonte: Antônio Guimarães, (2014).

A FIG. 3.14 mostra os 6 tambores plásticos, totalizando aproximadamente 480,0 kg de material, que após transportado, foram armazenados no Laboratório de Solos do IME. Na FIG. 3.15 é apresentada uma amostra do material.



FIG. 3.14 Armazenamento do resíduo em tambores, no laboratório do IME.



FIG. 3.15 Amostra do resíduo utilizado nesta pesquisa.

### 3.7.2 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

Nesta pesquisa, além do resíduo, os agregados escolhidos para a mistura são comercialmente denominados Brita 1, Brita 0 e Areia, todos da região de Magé/RJ. Estes materiais foram caracterizados de acordo com as normas DNIT para a utilização de agregados na pavimentação e os resultados dos ensaios estão na TAB. 3.10. Todos os procedimentos foram realizados no Laboratório de Ligantes e Misturas Betuminosas do IME.

TAB. 3.10 Resultado dos ensaios de caracterização dos agregados.

ENSAIOS	RESULTADOS				LIMITE
	BRITA 1	BRITA 0	AREIA	RESÍDUO	DNIT
Perda por abrasão Los Angeles	27%	46%	-	-	máx 50%
Perda ao choque no aparelho Treton	12%	-	-	-	-
Densidade real	2,798	2,703	2,620	2,830	-
Densidade aparente	2,750	2,666	-	-	-
Absorção	0,6%	0,8%	-	-	-
Equivalente de areia	-	-	64%	74%	mín 55%
Adesividade ao ligante asfáltico (CAP 50/70)	Não Satisfatória	-	-	-	-
Durabilidade (sulfato de magnésio – 5 ciclos)	5,92%	2,67%	9,69%	5,56%	máx 12%

De maneira preliminar, conclui-se que os materiais apresentam boa qualidade para emprego em misturas asfálticas e que principalmente o resíduo pode ser utilizado como produto classificado como agregado miúdo ou Areia. O ensaio de adesividade apresentou a necessidade de utilizar 0,10 % de melhorador de adesividade ao CAP.

Os resultados dos ensaios de abrasão Los Angeles, absorção e equivalente de areia também apontaram a boa qualidade desses agregados.

As características de forma, angularidade e textura dos agregados graúdos foram obtidas pelo método AIMS e estão apresentados na TAB. 3.11. Nota-se que o critério de lamelaridade previsto pela norma AASHTO M323-13 é atendido, com todas as frações apresentando um percentual inferior a 10% de partículas com taxa entre dimensões que excede 1:5.

TAB. 3.11 Características de forma dos agregados graúdos desta pesquisa.

PROPRIEDADES	CLASSIFICAÇÃO	AGREGADO			
		%	BRITA 1	BRITA 0	
			% ACUMULADO	%	% ACUMULADO
Esfericidade	Lamelar/Alongado	15%	15%	28%	28%
	Baixa	34%	49%	33%	61%
	Moderada	36%	85%	28%	89%
	Alta	15%	100%	11%	100%
Índice de Forma	Circular	19%	19%	20%	20%
	Semi-circular	27%	45%	32%	52%
	Semi-alongado	39%	85%	41%	93%
	Alongado	15%	100%	7%	100%
Angularidade	Arredondado	7%	7%	3%	3%
	Sub-arredondado	83%	90%	60%	63%
	Sub-angular	10%	100%	30%	93%
	Angular	0%	100%	7%	100%
Textura	Polido/Liso	22%	22%	37%	37%
	Baixa rugosidade	13%	35%	17%	54%
	Moderada rugosidade	24%	59%	17%	71%
	Alta rugosidade	41%	100%	29%	100%
Partículas Chatas e Alongadas	1 : 3	2%	-	20%	-
	1 : 5	0%	-	0%	-

Resumidamente, na TAB. 3.12 têm-se os parâmetros estatísticos dos agregados graúdos, sendo classificados conforme a proposição de CASTELO BRANCO *et al.* (2007), já apresentados.

TAB. 3.12 Forma dos agregados graúdos desta pesquisa.

PROPRIEDADES	BRITA 1			BRITA 0		
	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	CLASSIFICAÇÃO	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	CLASSIFICAÇÃO
Esfericidade	0,70	0,10	Baixa/Moderado	0,68	0,10	Baixa/Moderado
Índice de Forma	8,36	1,98	Semi-alongado	8,16	1,91	Semi-alongado
Angularidade	3.023	730	Arredondado	3.723	1.027	Arredondado
Textura	452	212	Moderada rugosidade	378	238	Moderada rugosidade

Em relação a areia e o resíduo, estes se enquadram como agregado miúdo e no AIMS, só se verifica a propriedade de índice de forma e angularidade. A TAB. 3.13 apresenta a distribuição percentual dos agregados dentro destas características.

TAB. 3.13 Características de forma dos agregados miúdos desta pesquisa.

PROPRIEDADES	CLASSIFICAÇÃO	AGREGADO			
		AREIA		RESÍDUO	
		%	% ACUMULADO	%	% ACUMULADO
Índice de Forma	Circular	19%	19%	31%	31%
	Semi-circular	32%	51%	29%	61%
	Semi-alongado	41%	92%	30%	91%
	Alongado	8%	100%	9%	100%
Angularidade	Arredondado	14%	14%	52%	52%
	Sub-arredondado	50%	64%	37%	89%
	Sub-angular	31%	95%	7%	97%
	Angular	5%	100%	3%	100%

Na TAB. 3.14 encontram-se os valores dos parâmetros estatísticos para os agregados miúdos e foram classificados, também, conforme a proposição de CASTELO BRANCO *et al.* (2007).

TAB. 3.14 Forma dos agregados miúdos desta pesquisa.

PROPRIEDADES	AREIA			RESÍDUO		
	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	CLASSIFICAÇÃO	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	CLASSIFICAÇÃO
Índice de Forma	8,13	1,93	Semi-alongado	7,71	2,17	Semi-circular
Angularidade	3.489	1.234	Arredondado	2.275	1.286	Arredondado

Assim como fez PAZOS (2015), na TAB. 3.15 estão apresentados os resultados do ensaio de Vazios sem compactação (AASHTO T304), os quais serviram de parâmetros para o enquadramento da angularidade dos agregados na metodologia *Superpave*.

Na mistura 3 foi realizada uma combinação de 32% de Areia e 68% de Resíduo para compor o agregado miúdo, com o intuito de melhorar o enquadramento granulométrico deste traço. Este novo agregado composto foi ensaiado por este método também. Os resultados deste ensaio foram satisfatórios para todos os agregados testados.

TAB. 3.15 Angularidade dos agregados pelo ensaio de vazios sem compactação.

AGREGADO	VAZIOS SEM COMPACTAÇÃO(%)	CRITÉRIOS AASHTO M323-13
Brita 1	49,1	
Brita 0	45,2	
Areia	45,0	> 45%
Resíduo	45,2	
Mistura 68% Resíduo e 32% Areia	45,1	

### 3.7.3 LIGANTE ASFÁLTICO

Conforme mencionado, foi utilizado o ligante asfáltico do tipo CAP 50/70, que foi analisado conforme os procedimentos estabelecidos pela especificação brasileira de cimento asfáltico de petróleo (Resolução nº 19 ANP, 2005) e a norma do DNIT 095/2006 vigente. Na TAB. 3.16 estão apresentados os resultados dos ensaios que serviram para caracterizar o CAP. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Ligantes e Misturas Betuminosas do IME.

TAB. 3.16 Caracterização do CAP 50/70, utilizado nesta pesquisa.

ENSAIOS	RESULTADO	LIMITES
<i>AMOSTRA VIRGEM</i>		
Penetração - 100g, 5s, 25°C (0,1mm)	61	50 a 70
Ponto de amolecimento (°C)	47	mín 46
a 135°C, SP 21, 20 rpm	465	mín 274
Viscosidade Brookfield (cP)	a 150°C, SP 21, 50 rpm	mín 112
a 177°C, SP 21, 100 rpm	81	57-285
Índice de susceptibilidade térmica	-1,5	-1,5 a +0,7
Ponto de fulgor (°C)	> 265°	mín 235
Solubilidade em tricloroetileno	99,5 %	mín 99,5%
Massa específica e densidade relativa, 25°C	1,055	-
Ductilidade, a 25°C (cm)	>120	mín 60
<i>APOÉS RTFOT @163°C, 85min</i>		
Varição em massa	0,02%	máx 0,5%
Ductilidade, a 25°C (cm)	>120	mín 20
Aumento do ponto de amolecimento (°C)	0,05	máx 8
Penetração retida	55%	mín 55%

Também foi possível traçar a curva viscosidade-temperatura, conforme a FIG. 3.16, para a obtenção das faixas de temperaturas ideais de mistura e de compactação dos corpos de prova, tanto para a metodologia Marshall quanto para a *Superpave*.

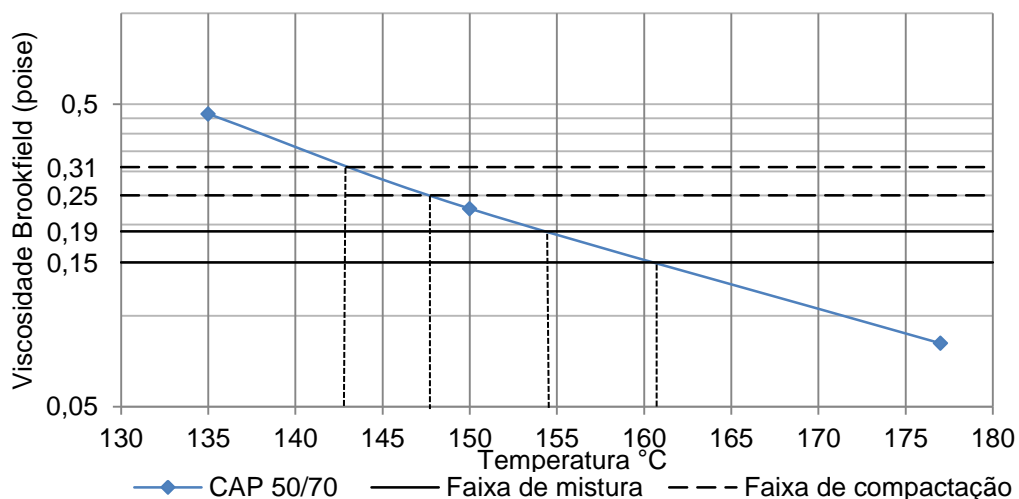


FIG. 3.16 Curva viscosidade x temperatura do CAP utilizado nesta pesquisa.

Na TAB. 3.17 estão indicadas as referências e os parâmetros adotados para obtenção das temperaturas utilizadas na pesquisa para a confecção dos corpos de prova.

TAB. 3.17 Parâmetros e referências para a determinação da temperatura do CAP.

PROCEDIMENTO	RESULTADO (°C)	LIMITES (poise)	USADOS NA PESQUISA
Mistura	154° a 161°	0,28 ± 0,03	158°
Compactação	143° a 148°	0,17 ± 0,02	146°

### 3.8 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A distribuição granulométrica dos agregados é uma de suas principais características e efetivamente influi no comportamento dos revestimentos asfálticos. Em misturas asfálticas a distribuição granulométrica do agregado influencia quase todas as propriedades importantes incluindo rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga e à deformação permanente, resistência ao dano por umidade induzida etc, conforme BERNUCCI, *et al.*, (2010). Em todos os agregados foi realizado a análise por peneiramento no Laboratório de Ligantes do IME e os resultados são apresentados a seguir.

#### 3.8.1 AGREGADOS E RESÍDUO

A análise granulométrica dos agregados foi realizada segundo a norma do DNER - ME 083/98 e seus resultados estão expressos na TAB. 3.18.



TAB. 3.18 Granulométrica dos materiais minerais utilizados nesta pesquisa.

PENEIRAS		% PASSANTE			
pol.	mm	BRITA 1	BRITA 0	AREIA	RESÍDUO
2"	50,8	100,0	100,0	100,0	100,0
1 1/2"	38	100,0	100,0	100,0	100,0
1"	25	100,0	100,0	100,0	100,0
3/4"	19	93,9	100,0	100,0	100,0
1/2"	12,7	33,8	100,0	100,0	100,0
3/8"	9,5	13,0	100,0	100,0	100,0
4	4,8	2,4	44,6	99,1	100,0
10	2	1,4	7,9	76,8	100,0
40	0,42	1,1	4,3	42,3	99,8
80	0,18	0,9	2,9	21,1	65,2
200	0,075	0,6	1,4	7,5	22,7

Na FIG. 3.17 estão representadas as curvas granulométricas características de cada agregado e do resíduo, facilitando a identificação dos materiais constituintes das misturas utilizadas nesta pesquisa.

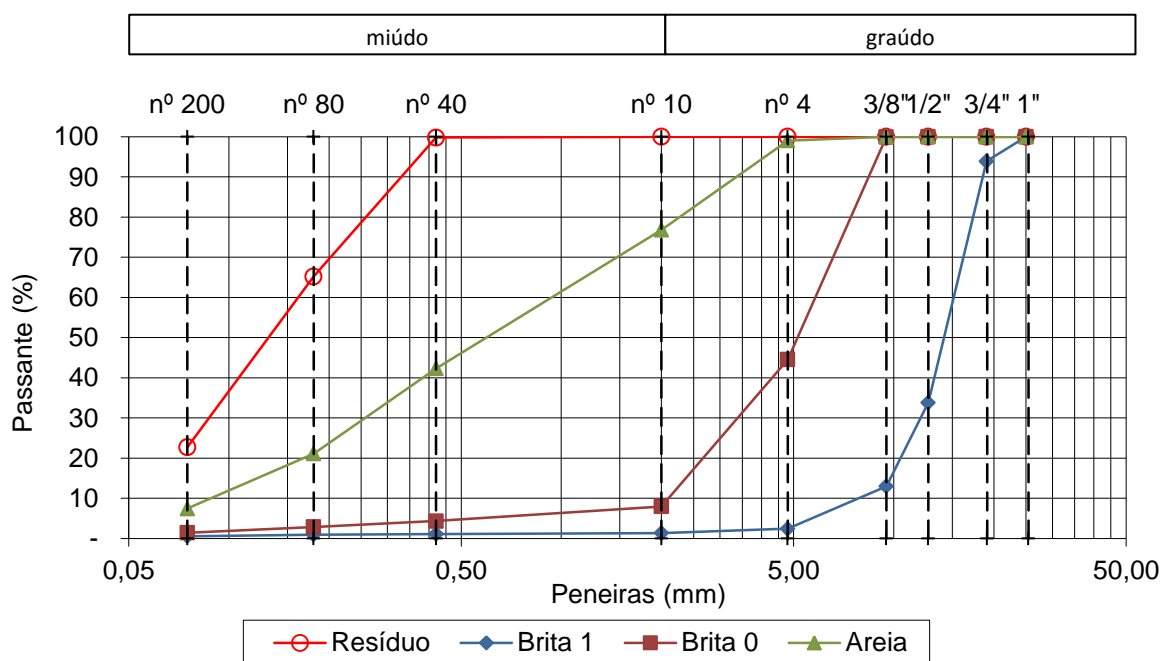


FIG. 3.17 Representação da granulometria dos agregados desta pesquisa.

Observa-se que o resíduo encontra-se enquadrado na faixa de agregado miúdo e possui cerca de 20% do material passante na peneira 0,075mm (nº 200), chamado de material de enchimento ou filer. Percebe-se que é um percentual elevado de finos, o que impossibilita a utilização de grande quantidade desse resíduo nas misturas asfálticas. Este fato será observado mais a frente quando for feito o enquadramento granulométrico das misturas.

### 3.8.2 MISTURAS PARA METODOLOGIA MARSHALL

Foram utilizadas 3 misturas diferentes de agregados para comparação nesta pesquisa. As curvas granulométricas foram ajustadas para atender a faixa C de CA da especificação brasileira DNIT 031/2010. Optou-se por utilizar os materiais da forma como se apresentam nos depósitos, sem que fosse feito qualquer processo de separação por peneira dos agregados.

Como dito, as misturas foram designadas conforme a TAB. 3.19, sendo a mistura M1 uma convencional de comparação, a M2 optou-se por utilizar o máximo de resíduo possível substituindo completamente a fração areia da M1 e na M3 procurou-se melhorar o enquadramento granulométrico da mistura fazendo substituição parcial, sendo 68% de resíduo e 32% de areia, como agregado miúdo.

TAB. 3.19 Designação das misturas asfálticas utilizadas nesta pesquisa.

DESCRIÇÃO	COMPOSIÇÃO
M1	Brita 1, Brita 0 e Areia
M2	Brita 1, Brita 0 e Resíduo
M3	Brita 1, Brita 0, Resíduo e Areia

Na TAB. 3.20 estão apresentados os percentuais em massa dos agregados que compõem cada mistura. Verifica-se que pela característica dos agregados miúdos não houve a necessidade de inclusão de filer artificial nas misturas.

TAB. 3.20 Proporção dos agregados nas misturas utilizadas nesta pesquisa.

MATERIAL	PERCENTUAL EM MASSA		
	M1	M2	M3
Brita 1	20	15	20
Brita 0	40	65	55
Areia	40	-	8
Resíduo	-	20	17

Após o enquadramento granulométrico das misturas dentro da faixa C do DNIT, obtiveram-se os resultados de material passante em cada peneira, apresentados na TAB. 3.21, com o Tamanho Nominal Máximo (TMN) de cada mistura.

TAB. 3.21 Granulometrias das misturas para Marshall.

PENEIRA (mm)	PERCENTUAL PASSANTE		
	M1	M2	M3
25,4 (1")	100,0	100,0	100,0
19 (3/4")	98,8	99,1	98,8
12,7 (1/2")	86,8	90,1	86,8
9,5 (3/8")	82,6	86,9	82,6
4,74 (#4)	57,9	49,3	49,9
2,0 (#10)	34,2	25,4	27,8
0,42 (#40)	18,9	23,0	23,0
0,18 (#80)	9,8	15,1	14,5
0,075 (#200)	3,7	5,6	5,4
TMN(mm)	19	19	19

Com o intuito de melhorar a visualização da distribuição granulométrica, na FIG. 3.18 estão representadas as curvas granulométricas das misturas, onde se observa a distribuição dos percentuais passantes em cada peneira e o enquadramento das curvas de cada mistura dentro dos limites da faixa C do DNIT.

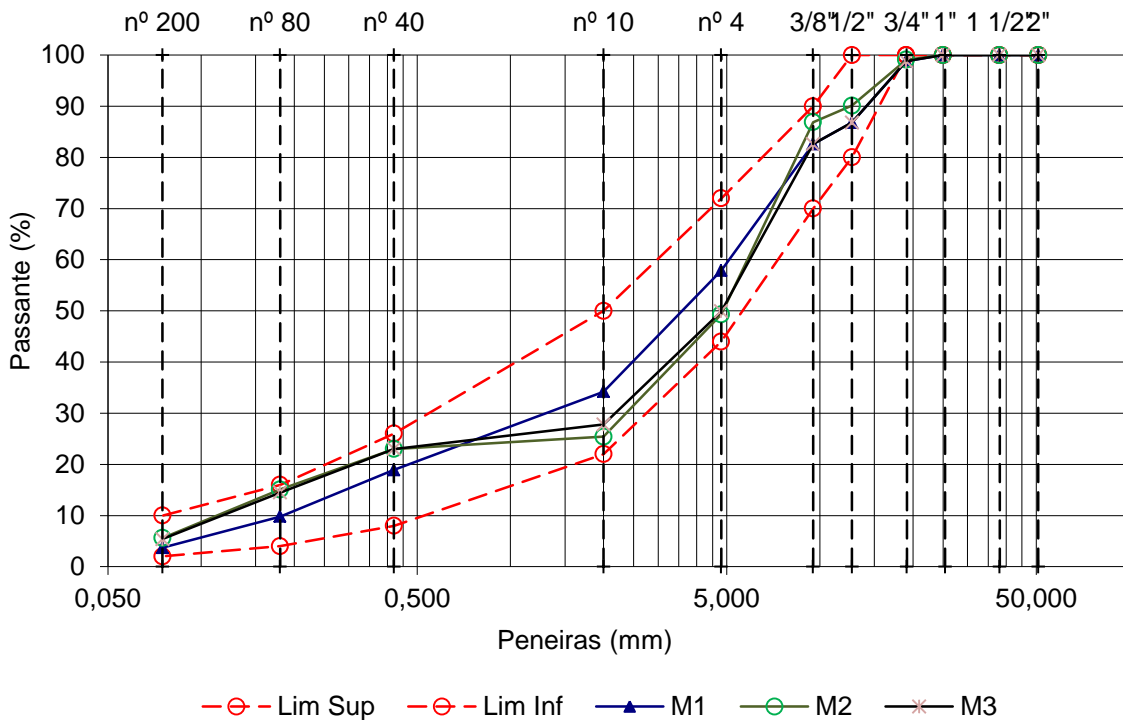


FIG. 3.18 Curvas granulométricas das misturas asfálticas nesta pesquisa.

A mistura M3 foi projetada buscando melhorar o enquadramento da mistura M2 dentro da faixa C do DNIT, pois esta apresentava valores muito próximos aos limites inferiores e superiores, em alguns pontos da referida faixa.

### 3.8.3 MISTURAS PARA METODOLOGIA SUPERPAVE

Para a metodologia *Superpave* foram utilizadas apenas as misturas M1 e M2. As curvas granulométricas foram ajustadas para atender simultaneamente a faixa C de CA da especificação brasileira DNIT 031/2010 e a especificação norte-americana AASHTO M323-13. Optou-se por utilizar os materiais da forma como se apresentam nos depósitos, sem que fosse feito qualquer processo de separação por peneira dos agregados.

Manteve-se a mesma designação das misturas conforme a TAB. 3.19 e os mesmos percentuais dos agregados na TAB. 3.20, somente verificando o enquadramento nas faixas e representações do método *Superpave*.

As curvas granulométricas foram plotadas em gráficos com aberturas de peneira elevadas à potência 0,45. Assim, é possível visualizar a linha de densificação máxima e os pontos de controle previstos pela norma AASHTO M323-13, apresentados na TAB. 3.22, além disto, plotou-se também as curvas dos limites da faixa C do DNIT.

TAB. 3.22 Pontos de controle TMN - método AASHTO M323-13.

PENEIRA (mm)	PORCENTAGEM EM MASSA PASSANTE									
	37,5 mm		25 mm		19 mm		12,5 mm		9,5 mm	
	MÍN.	MÁX	MÍN.	MÁX	MÍN.	MÁX	MÍN.	MÁX	MÍN.	MÁX
50,8 (2")	100									
38 (1 1/2")	90	100	100							
25,4 (1")		90	90	100	100					
19,1 (3/4")				90	90	100	100			
12,7 (1/2")						90	90	100	100	
9,5 (3/8")								90	90	100
4,74 (#4)										90
2,0 (#10)	15	41	19	45	23	49	28	58	32	67
0,42 (#40)										
0,18 (#80)										
0,075 (#200)	0	6	1	7	2	8	2	10	2	10

Na TAB. 3.23 é apresentado o enquadramento granulométrico das misturas com os respectivos percentuais em cada peneira. Indica-se, também, o Tamanho Nominal Máximo (TMN) de cada mistura, que para a metodologia *Superpave* é diferente da metodologia adotada pelo DNIT. O TMN na *Superpave* é definido como sendo um tamanho maior do que o primeiro tamanho de peneira que retém mais de 10%, conforme é observado por BERNUCCI, *et al.*( 2010). Conforme este critério o TMN da M2 fica diferente da M1 e do critério DNIT.

TAB. 3.23 Granulometrias das misturas para *Superpave*.

PENEIRA (mm)	PERCENTUAL PASSANTE	
	M1	M2
50,8 (2")	100,0	100,0
38 (1 1/2")	100,0	100,0
25,4 (1")	100,0	100,0
19 (3/4")	98,8	99,1
12,7 (1/2")	86,8	90,1
9,5 (3/8")	82,6	86,9
4,74 (#4)	57,9	49,3
2,0 (#10)	34,2	25,4
0,42 (#40)	18,9	23,0
0,18 (#80)	9,8	15,1
0,075 (#200)	3,7	5,6
TMN(mm)	19	12,5

As FIG. 3.19 e FIG. 3.20 mostram a representação das curvas granulométricas das misturas M1 e M2 conforme a metodologia *Superpave*. Nestas mesmas figuras são mostrados os limites da faixa C das especificações do DNIT, a linha de Máxima Densificação (LMD) e os pontos de controle conforme o TMN de cada mistura, previstos na AASHTO.

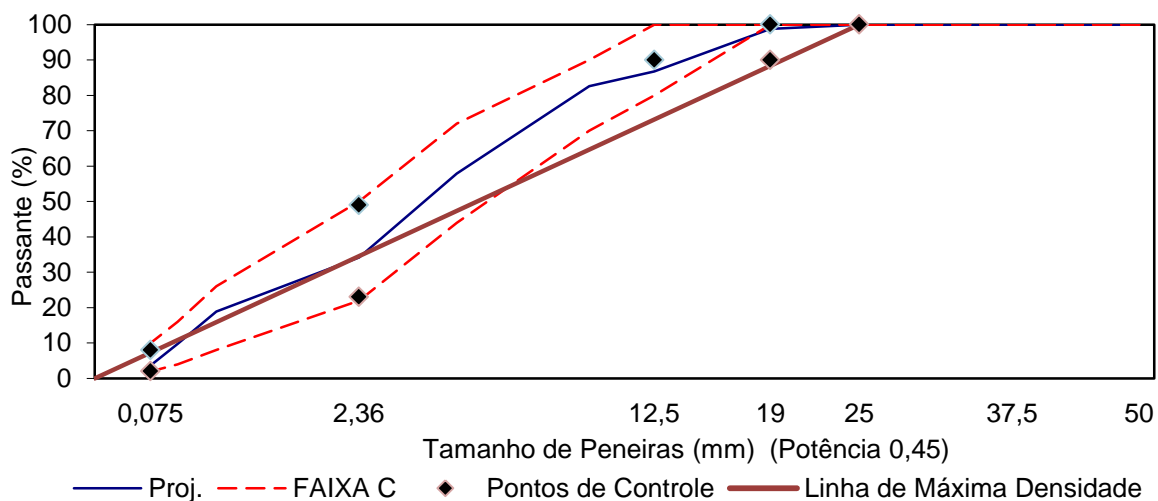


FIG. 3.19 Representação gráfica da mistura M1 com TMN de 19mm.

Observa-se que a mistura M1 passa entre os pontos de controle e apresenta a forma de “S”. Além disto, sua fração graúda encontra-se acima da linha de máxima densificação e sua fração miúda está próxima a esta linha, sendo caracterizada como uma mistura média segundo a AASHTO M323-13.

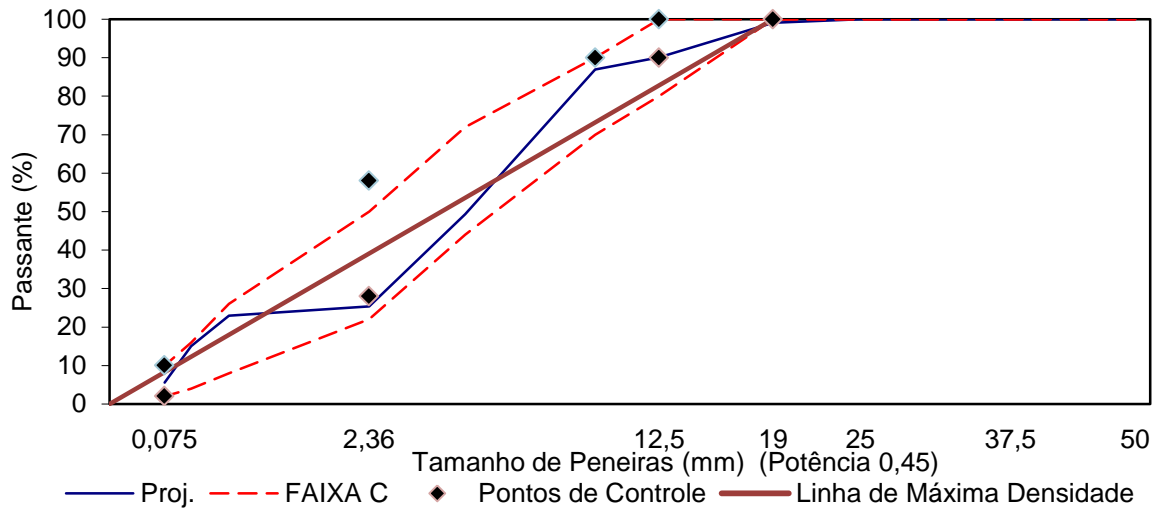


FIG. 3.20 Representação gráfica da mistura M2 com TMN de 12,5mm.

Verifica-se que a mistura M2 passa entre os pontos de controle com exceção da peneira 2,36mm, a curva tem a forma de “S”, com sua fração graúda acima da linha de máxima densificação e a fração miúda abaixo desta linha, caracterizando com isso uma mistura graúda segundo a AASHTO M323-13.

## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

O presente capítulo apresenta os resultados e conclusões parciais obtidos na dosagem das misturas através dos dois métodos em estudo. São apresentados também, os resultados dos ensaios mecânicos realizados nas misturas definidas como sendo as ótimas e, por fim, uma análise comparativa econômica entre a mistura asfáltica convencional e a mistura M2 que utiliza o resíduo em substituição total da areia.

### 4.1 DOSAGEM MARSHALL

Após a definição das granulometrias das misturas e do ligante, procedeu-se o método Marshall de dosagem de misturas asfálticas, utilizando as instalações do Laboratório de Ligantes e Misturas Betuminosas do IME.

A dosagem seguiu os parâmetros de referência da norma DNIT - ES 031/2006. Para a determinação dos parâmetros volumétricos, utilizou-se a densidade máxima medida da mistura asfáltica (Gmm), obtido pelo método Rice.

#### 4.1.1 RESULTADOS DA MISTURA M1

Para esta mistura optou-se por começar a variação dos teores a partir do 4,0%, variando de 0,5% até o teor de 6,0%, resultando assim 5 teores. Após a verificação dos parâmetros, tendo em vista que o teor obtido para o projeto ficou próximo ao teor 6,0%, foi moldado o teor de 6,5% para a confirmação do teor de projeto encontrado. Foram executados 5 corpos de prova para cada teor escolhido; na TAB. 4.1 estão apresentados todos os parâmetros médios de cada teor.



TAB. 4.1 Parâmetros de dosagem Marshall obtidos para a mistura M1.

% LIGANTE	MASSA ESPECÍFICA		VV (%)	RBV (%)	VAM (%)	ESTABILIDADE (kgf)	RT (MPa)
	MEDIDA	APARENTE					
	(Gmm) (kg/cm <sup>3</sup> )	(Gmb) (kg/cm <sup>3</sup> )					
Referência (DNIT-ES 031/2006)	-	-	3 - 5	75 - 82	TMN 19mm >15,0	>500	>0,65
4,0	2,535	2,317	8,5	50,5	17,2	1064	1,2
4,5	2,523	2,340	6,8	58,0	16,8	1146	1,2
5,0	2,497	2,355	5,6	66,3	16,7	1157	1,2
5,5	2,472	2,369	4,3	74,8	16,7	1438	1,3
6,0	2,464	2,373	3,5	78,6	17,0	1427	1,2
6,5	2,444	2,394	2,0	87,9	16,7	1517	1,2

A partir dos parâmetros da TAB. 4.1, pode-se então selecionar o teor de projeto a partir dos parâmetros de dosagem VV e RBV. Com os valores médios de VV e RBV obtidos nos grupos de corpos de prova foi possível traçar o gráfico da FIG. 4.1 com teor de asfalto (no eixo “x”) versus VV (no eixo “y1”) e RBV (no eixo “y2”). Adicionam-se então linhas de tendência para os valores encontrados dos dois parâmetros.

O gráfico deve conter ainda os limites específicos das duas variáveis, indicados pelas linhas tracejadas, e apresentados na TAB. 4.1, como referência. A partir da interseção das linhas de tendência do Vv e do RBV com os limites respectivos de cada um destes parâmetros, foram determinados quatro teores de CAP (X1, X2, X3 e X4). O teor ótimo é selecionado tomando a média dos dois teores centrais, ou seja, teor ótimo =  $(X2 + X3)/2$ . Este procedimento é apresentado por BERNUCCI *et al.*(2010).

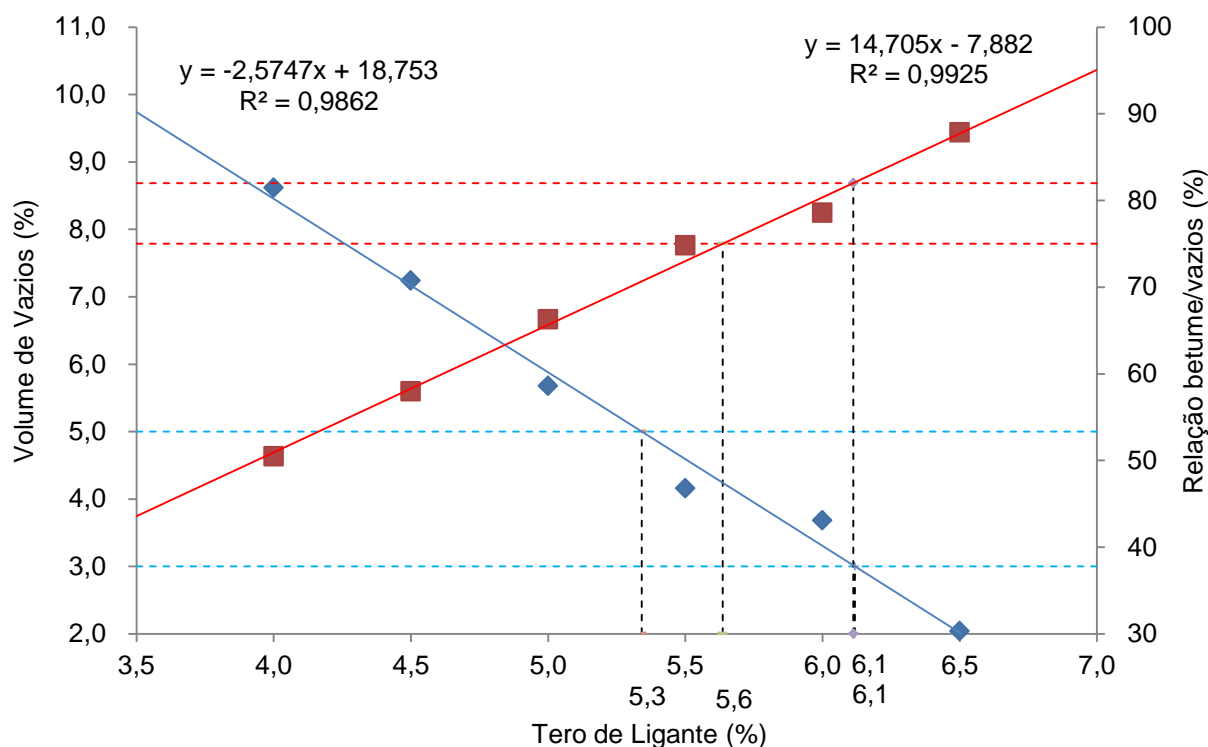


FIG. 4.1 Teor de asfalto versus Vv e RBV da mistura M1.

A partir da TAB. 4.1 e da FIG. 4.1 pode-se observar que a mistura M1 atende a todas as referências exigidas pela norma DNIT-ES 031/2006. O traço de projeto com o teor ótimo desta mistura é apresentado na TAB. 4.2.

TAB. 4.2 Percentual do Teor de Projeto da mistura M1 pelo método Marshall.

MATERIAL	%
Teor de Ligante	5,9
Brita 1	18,8
Brita 0	37,6
Areia	37,6

#### 4.1.2 RESULTADOS DA MISTURA M2

Para esta mistura optou-se por começar a variação dos teores a partir do 4,5% com variações de 0,5% alcançando o teor de 6,5%, totalizando assim 5 teores. Foram executados 5 corpos de prova para cada teor escolhido, sendo que na TAB. 4.3, estão apresentados todos os parâmetros médios obtidos.

TAB. 4.3 Parâmetros da dosagem Marshall obtidos para a mistura M2.

% LIGANTE	MASSA ESPECÍFICA		VV (%)	RBV (%)	VAM (%)	ESTABILIDADE (kgf)	RT (MPa)
	MEDIDA (Gmm) (kg/cm <sup>3</sup> )	APARENTE (Gmb) (kg/cm <sup>3</sup> )					
Referência (DNIT-ES 031/2006)	-	-	3 - 5	75 - 82	TMN 19mm >15,0	>500	>0,65
4,5	2,557	2,400	6,1	62,5	16,4	1046	1,2
5,0	2,532	2,404	5,0	69,3	16,4	1275	1,3
5,5	2,515	2,423	3,7	77,5	16,3	1409	1,4
6,0	2,493	2,435	2,3	85,7	16,2	1283	1,1
6,5	2,488	2,453	1,4	91,4	16,5	1232	1,3

A partir dos parâmetros da TAB. 4.3, assim como foi descrito no item 4.1.1, pode-se traçar o gráfico da FIG. 4.2 do teor de asfalto (no eixo “x”) versus VV (no eixo “y1”) e RBV (no eixo “y2”). Para os valores encontrados dos dois parâmetros, adicionou-se então a linha de tendência. A partir destes, selecionou-se o teor ótimo da mistura, conforme o procedimento apresentado por BERNUCCI *et al.*(2010).

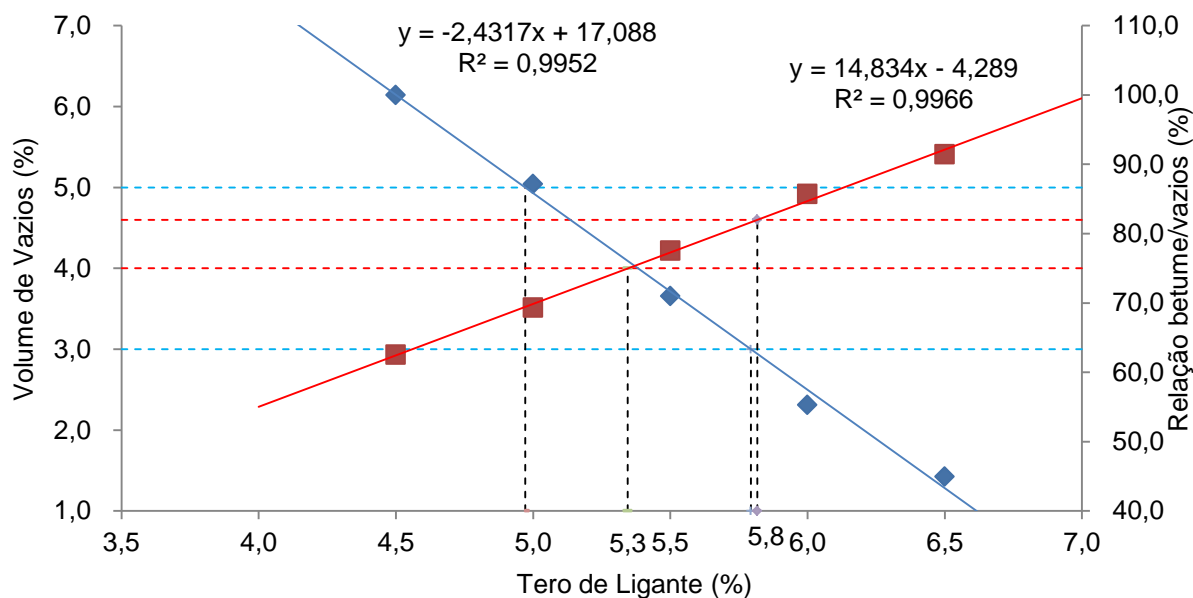


FIG. 4.2 Teor de asfalto versus Vv e RBV da mistura M2.

A partir da TAB. 4.3 e da FIG. 4.2 pode-se observar que a mistura 2 atende a todos as referências exigidas pela norma DNIT-ES 031/2006 e que o traço de projeto com o teor ótimo desta mistura é o apresentado na TAB. 4.4.

TAB. 4.4 Percentual do Teor de Projeto da mistura M2 pelo método Marshall.

MATERIAL	%
Teor de Ligante	5,6
Brita 1	14,2
Brita 0	61,4
Resíduo	18,9

#### 4.1.3 RESULTADOS DA MISTURA M3

Para esta mistura optou-se por começar a variação dos teores a partir do 4,5% e variando de 0,5% até o teor de 6,5%, resultando assim 5 teores. Foram executados 5 corpos de prova para cada teor escolhido, na TAB. 4.5, estão apresentados todos os parâmetros médios obtidos.

TAB. 4.5 Parâmetros de dosagem Marshall obtidos para a mistura M3.

% LIGANTE	MASSA ESPECÍFICA		VV (%)	RBV (%)	VAM (%)	ESTABILIDADE (kgf)	RT (MPa)
	MEDIDA (Gmm) (kg/cm <sup>3</sup> )	APARENTE (Gmb) (kg/cm <sup>3</sup> )					
Referência (DNIT-ES 031/2006)	-	-	3 - 5	75 - 82	TMN 19mm >15,0	>500	>0,65
4,5	2,550	2,415	5,4	65,6	15,7	1349	1,2
5,0	2,526	2,409	4,9	69,9	16,4	1435	1,1
5,5	2,516	2,440	3,0	81,0	15,7	1541	1,5
6,0	2,505	2,449	1,9	87,9	15,9	1370	1,3
6,5	2,488	2,446	1,3	91,9	16,4	1431	1,3

A partir dos parâmetros acima, assim como foi descrito no item 4.1.1, pode-se traçar o gráfico da FIG. 4.3 do teor de asfalto (no eixo “x”) versus VV (no eixo “y1”) e RBV (no eixo “y2”). Adicionam-se então linhas de tendência para os valores

encontrados dos dois parâmetros. A partir destes, selecionou-se o teor ótimo da mistura, conforme o procedimento apresentado por BERNUCCI *et al.*(2010).

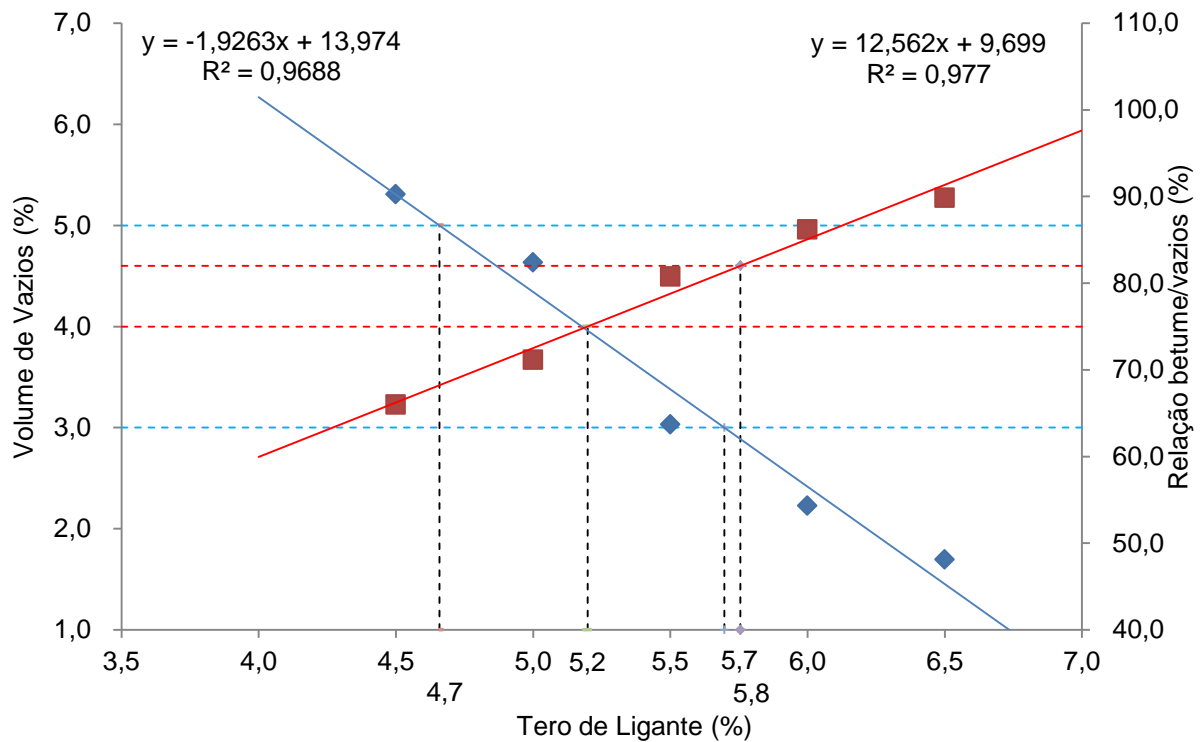


FIG. 4.3 Teor de asfalto versus Vv e RBV da mistura M3.

A partir da TAB. 4.5 e da FIG. 4.3 pode-se observar que a mistura M3 atende a todos as referências exigidas pela norma DNIT-ES 031/2006 e que o traço de projeto com o teor ótimo desta mistura é o apresentado na TAB. 4.6.

TAB. 4.6 Percentual do Teor de Projeto da mistura M3 pelo método Marshall.

MATERIAL	%
Teor de Ligante	5,5
Brita 1	18,9
Brita 0	52,0
Resíduo	16,1
Areia	7,6

#### 4.1.4 COMPARAÇÃO ENTRE AS MISTURAS

A partir dos teores ótimos de cada mistura foram executados 5 corpos de prova de cada uma delas. Para cada uma das misturas foram realizados os ensaios de Estabilidade e Resistência à Tração Indireta, totalizando 15 cps. A seguir estão apresentados na TAB. 4.7 os resultados dos ensaios com os teores ótimos de cada mistura e os parâmetros de referência preconizados na norma DNIT - ES 031/ 2006.

TAB. 4.7 Parâmetros finais da dosagem Marshall desta pesquisa.

MISTURAS	% LIGANTE PROJETO	PARÂMETRO				
		Vv %	RBV %	ESTABILIDADE (kgf)	RT (Mpa)	VAM %
Referência DNIT-ES 031/2006	4,5 - 9,0	3 a 5	75 a 82	> 500	> 0,65	> 15
M 1	5,9	3,1	81,4	1710	1,4	16,3
M 2	5,6	3,9	76,7	1361	1,5	16,7
M 3	5,5	3,1	80,7	1442	1,6	15,7

Todas as misturas atenderam aos critérios estabelecidos na norma DNIT-ES 031/2006 com relação ao percentual do volume de vazios (Vv), ao percentual de betume/vazios (RBV), a estabilidade, a resistência à tração indireta e ao percentual de vazios do agregado mineral (VAM).

Conforme pode ser verificada a partir da TAB. 4.7, nota-se uma redução próximo de 5% do teor de projeto da M1 para a M2 e M3, houve também, uma melhora no %Vv, porém ocorreu uma perda da estabilidade, provavelmente por ser uma mistura com características mais fina.

Observando a mistura M3 em comparação com a mistura M2, percebe-se que praticamente não houve ganho significativo dos parâmetros apresentados, somente uma redução da utilização do resíduo na mistura. Nesse sentido, como o intuito deste trabalho é maximizar a utilização do mesmo no CA, decidiu-se que a mistura M2 seria a ideal para a continuação na pesquisa.

Após a determinação do teor de projeto de ligante, foram moldados mais 13 corpos de prova por mistura, totalizando mais 39 amostras, empregadas nos ensaios mecânicos que serão discutidos a seguir.

## 4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS

A seguir, serão apresentados os resultados dos ensaios de módulo de resiliência (MR) e vida de fadiga à tensão controlada para caracterização mecânica das misturas moldadas pelo processo Marshall.

### 4.2.1 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Muitas pesquisas vêm sendo feitas na área da pavimentação utilizando os resultados do ensaio o Módulo de Resiliência para a verificação da influência das composições das misturas no comportamento destas durante a vida útil (MARQUES, 2004; NASCIMENTO *et.al.*, 2006, NASCIMENTO, 2015; GALHARDO, 2015).

Os resultados dos ensaios de módulo de resiliência e seus respectivos parâmetros estatísticos estão contidos na TAB 4.8. O MR médio foi tomado como a média aritmética de todos os resultados obtidos nos ensaios, após a aplicação do Teste de Grubbs, o qual verifica a existência de valores aberrantes dentro de um espaço amostral. Nesta pesquisa nenhum valor extremo foi desconsiderado pelo critério adotado.

Analisando os resultados, constata-se que todas as misturas apresentam valores relativamente baixos de coeficiente de variação menores que 12%, com a pouca variabilidade dos valores.

Apesar dos valores terem se comportado de forma uniforme decidiu-se por realizar o cálculo do MR médio, característico de cada mistura, como a média aritmética dos resultados que se enquadraram dentro do intervalo de confiança de 95%. Este procedimento foi útil para a eliminação de resultados discrepantes nas misturas, apesar de que nenhum valor extremo foi acusado pelo teste de Grubbs. Os resultados estão apresentados na TAB. 4.9.

TAB. 4.8 Ensaios de MR das misturas preparadas pelo método Marshall.

MISTURA	CP	RESULTADO (MPa)	MISTURA	CP	RESULTADO (MPa)	MISTURA	CP	RESULTADO (MPa)
		6029			4990			5165
	14	5929		13	4822		14	5019
		5591			4816			4847
		6545			5357			5206
	15	6082		14	5256		15	5058
		5898			5035			5195
M1		5798	M2		6177	M3		6760
TEOR	16	5685	TEOR	15	5853	TEOR	16	6478
5,9%		5600	5,6%		5821	5,4%		6289
		5756			5222			5992
	17	5409		16	4961		17	5470
		5194			4878			5183
		5026			4905			4960
	18	4936		17	4742		18	4832
		4744			4777			4813
MR médio		5615			5174			5418
Desvio Padrão		484			446			642
Coeficiente de Variação		8,6%			8,6%			11,8%

TAB. 4.9 Tratamento estatístico dos resultados de MR.

MISTURA	INTERVALO DE CONFIANÇA (95%) (MPa)	DESVIO PADRÃO (MPa)	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO	MR MÉDIO (MPa)
M1	5347 a 5883	140	2,5%	5640
M2	4927 a 5421	163	3,2%	5137
M3	5062 a 5773	127	2,4%	5244

Com relação à média dos valores das misturas, após o procedimento, é possível verificar pela análise da TAB. 4.9, uma redução tanto nos valores de MR, quanto nos valores de coeficiente de variação. Pode-se concluir desta forma, que houve um decréscimo de cerca de 9% do valor de MR da mistura M1 (5640 Mpa) em relação a M2 (5137 Mpa) e em relação a M3 (5244 Mpa) a redução foi de 7%. Portanto a mistura M2 é um pouco menos rígida que as outras. Como visto os valores de perda



de MR são baixos, atrelados a isto, a presença do resíduo não é um indicativo desta perda e sim um conjunto de fatores, como, por exemplo, a alteração da granulometria. Posto isto, conclui-se que a substituição da areia pelo resíduo é perfeitamente aceitável.

Na FIG. 4.4 tem-se uma melhor visualização dos valores MR médios de cada mistura, onde se observa que as três misturas apresentam valores bem semelhantes. A mistura M2 apesar de ter tido o valor mais baixo de MR (5137 Mpa) entre as misturas desta pesquisa, ainda apresenta um valor mais elevado do que o apresentado por BERNUCCI, *et al*, (2010) 3033 MPa para uma mistura da faixa C utilizando CAP 50/70, quando comparado com MARQUES (2004) e SILVA (2010) este já apresenta valor compatível.

PAZOS (2015) afirma que nos últimos anos as misturas asfálticas aplicadas em obras no Rio de Janeiro também têm apresentado valores elevados de rigidez, comprovando, assim, que os valores de MR seguem uma tendência de aumento de valores.

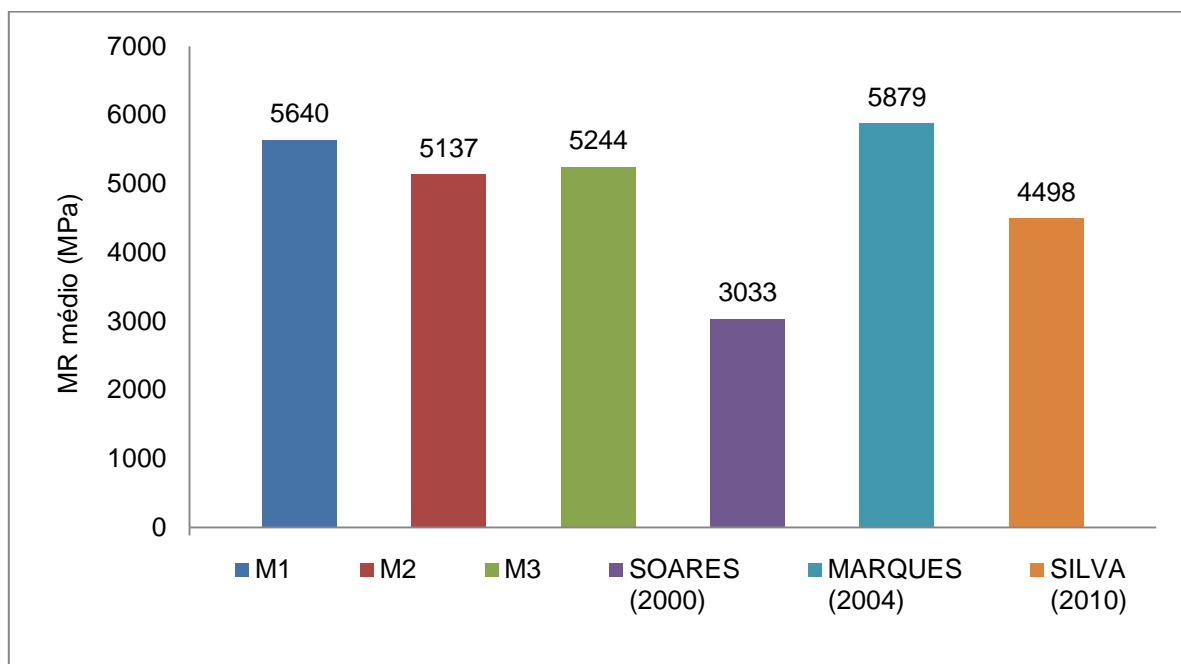


FIG. 4.4 Comparativo de MR das misturas desta pesquisa.

#### 4.2.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

A FIG. 4.5 apresenta os resultados médios do ensaio de resistência à tração a 25°C realizados com três corpos de prova de cada mistura estudada nesta pesquisa.

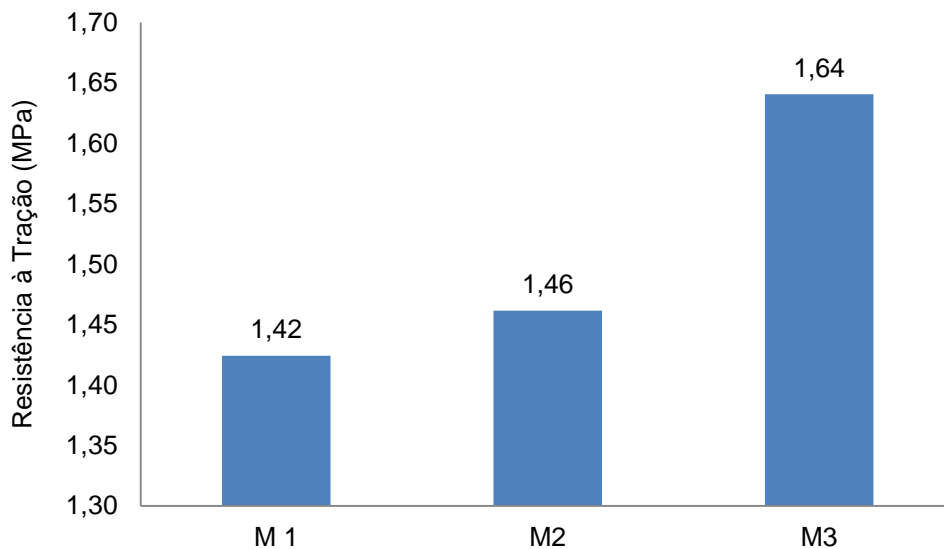


FIG. 4.5 Resistência à Tração das misturas avaliadas nesta pesquisa.

Da figura, pode-se observar que houve um acréscimo de RT quando se utilizou o resíduo e a mistura M3 apresentou um valor de resistência à tração maior do que as demais misturas. As outras misturas mostraram valores estatisticamente semelhantes de resistência à tração, considerando os valores médios individuais dos resultados de cada mistura.

Os resultados apresentados para as três misturas, conforme visto na FIG. 4.5 atendem ao especificado na norma DNIT - ES 031/2006 que indica o valor de 0,65 MPa como valor mínimo de RT para CA. Portanto, percebe-se para esta característica da mistura que a substituição da areia pelo resíduo é possível.

#### 4.2.3 VIDA DE FADIGA

O ensaio de fadiga foi realizado com 5 níveis de tensão, ajustados em 10%, 20%, 30%, 40% e 45% da resistência à tração indireta (RT). A partir destes resultados foi possível o traçado das curvas de diferença de tensões ( $\Delta\sigma$ ) x número de ciclos necessários à ruptura ( $N_f$ ), conforme a FIG. 4.6.

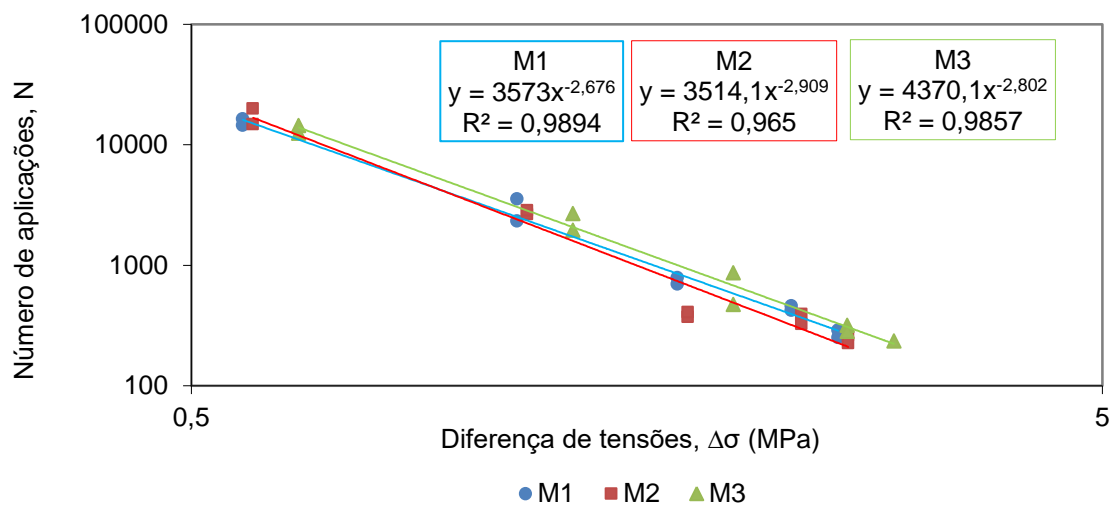


FIG. 4.6 Curva de fadiga das misturas Marshall desta pesquisa ( $\Delta\sigma \times N_f$ )

Na FIG. 4.7 foi considerada a característica resiliente de cada mistura através do MR, com isso uma relação da deformação específica resiliente ( $\epsilon_r$ ) também foi estabelecida com  $N_f$ .

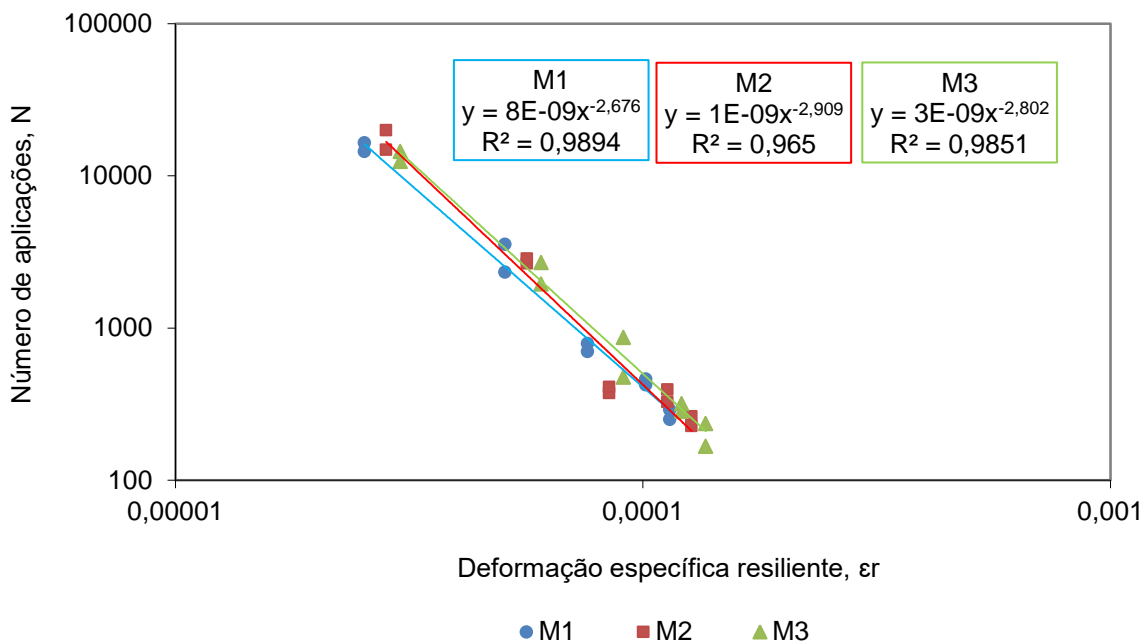


FIG. 4.7 Curva de fadiga das misturas Marshall desta pesquisa ( $\epsilon_r \times N_f$ )

Na TAB. 4.10 estão informados os coeficientes de regressão e de correlação, oriundos da regressão dos pontos das curvas de vida de fadiga em escala exponencial.

TAB. 4.10 Parâmetros de regressão das curvas de vida de fadiga das misturas.

MISTURA	$N_f = a_1 (\Delta\sigma)^{b_1}$			$N_f = k_1 (\epsilon_r)^{k_2}$		
	$a_1$	$b_1$	$R^2$	$K_1$	$K_2$	$R^2$
M1	3573	-2,676	0,9894	8E-09	-2,676	0,9894
M2	3514	-2,909	0,9650	1E-09	-2,909	0,9650
M3	4370	-2,802	0,9857	3E-09	-2,802	0,9851

Pela análise dos resultados, a partir da TAB. 4.10, pode-se observar que as misturas apresentaram resultados com pequena dispersão no espaço log-log, visto que as curvas lineares de regressão apresentaram valores de coeficiente de determinação superiores a 90%.

Normalmente não é possível uma comparação direta das curvas de fadiga, mas neste caso como os valores de MR são próximos, observa-se que a mistura M3 apresenta uma vida de fadiga ligeiramente maior que as outras duas. Esta comparação direta preliminarmente foi possível, tendo em vista a semelhança entre os valores de módulo de resiliência das misturas, conforme apresentado na TAB. 4.9 (PAZOS, 2015).

Porém, uma análise mais adequada é o que se faz envolvendo uma estrutura de pavimento, o carregamento, o tráfego e a variação climática, o que se faz a seguir.

#### 4.2.4 SIMULAÇÃO NO SISPAV

Para a realização da comparação do comportamento das misturas levando em consideração uma estrutura do pavimento, a rigidez das camadas, o tipo de carregamento, o tráfego e as variações climáticas ao longo do ano, optou-se pela utilização das equações características de cada mistura provindas do ensaio de Vida de Fadiga. Esta relação é inserida no programa *SisPav* versão 2007 (FRANCO,

2007), para uma simulação da deformação e, com isso, estimar a vida de serviço deste pavimento.

O princípio do programa baseia-se em uma abordagem mecanística-empírico, baseada em ensaios mecânicos e observações direcionadas à realidade nacional. Os principais elementos de influência no dimensionamento usando do SisPav são o tráfego, o ambiente (clima) e os materiais envolvidos (estrutura).

A estrutura de um pavimento pode ser resumida nas propriedades relativas ao tipo de material utilizado, à espessura das camadas, ao módulo de resiliência, ao coeficiente de Poisson e à condição de aderência das camadas.

Neste estudo admitiu-se uma estrutura de pavimento composta por quatro camadas: revestimento, base, sub-base e subleito. A estrutura do pavimento, utilizado no dimensionamento é apresentada na FIG. 4.8.



FIG. 4.8 Estrutura do pavimento simulado na comparação das misturas.

Na composição das camadas de base, sub-base e subleito foram utilizados os valores de MR e coeficiente de Poisson adotados por GALHARDO (2015), variando apenas a espessura da base e o volume de tráfego utilizado. Estes valores estão apresentados na TAB. 4.11.

TAB. 4.11 Parâmetros de referência utilizados por GALHARDO (2015).

CAMADA	TIPO	PARÂMETRO					
		ESPESSURA (m)	COEF. POISSON	MODELO	MR/K1	K2	K3
BASE	Material Granular	0,20	0,350	Elástico linear	500	-	-
SUB-BASE	50 % de Solo Residual Filito e 50% de Resíduo de minério de ferro.	0,25	0,350	Modelo Composto f( $\sigma_3$ , $\sigma_D$ )	94,36	0,2590	-0,5570
SULEITO	Solos finos, siltosos ou argilosos	-	0,400	Elástico linear	52	-	-

Para a composição da camada de revestimento betuminoso do pavimento testado no SisPav utilizou-se os valores de MR e a função de Vida de Fadiga de cada mistura obtidos nos respectivos ensaios. Na TAB. 4.12 estão apresentados estes parâmetros para cada mistura.

TAB. 4.12 Parâmetros da camada de revestimento betuminoso desta pesquisa.

MISTURA	ESPESSURA (m)	COEF. POISSON	MODELO	MR	Vida de Fadiga $N_f = k_1 (\epsilon_r)^{k_2}$	
					K1	K2
M1	0,05	0,337	Elástico linear	5.640	$8 \times 10^{-9}$	-2,676
M2	0,05	0,337	Elástico linear	5.137	$1 \times 10^{-9}$	-2,909
M3	0,05	0,337	Elástico linear	5.244	$3 \times 10^{-9}$	-2,802

Para determinação da espessura da camada de revestimento, tomou-se como base o Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT, 2006), que estabelece as espessuras recomendadas de acordo com o tráfego, conforme apresentado na TAB. 4.13.

TAB. 4.13 Espessura mínima dimensionamento DNIT (2006).

N	ESPESSURA MÍNIMA DE REVESTIMENTO
$N \leq 10^6$	Tratamentos superficiais betuminosos
$10^6 \leq N \leq 5 \times 10^6$	Revestimentos betuminosos com 5,0 cm de espessura
$5 \times 10^6 \leq N \leq 10^7$	Concreto betuminoso com 7,5 cm de espessura
$10^7 \leq N \leq 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 10,0 cm de espessura
$N > 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 12,5 cm de espessura

Para o dimensionamento de um pavimento flexível de uma rodovia, é necessário determinar o número 'N'. Segundo o referido manual, o número 'N' é definido pelo número de repetições de um eixo-padrão de 8,2 toneladas durante o período de vida útil do projeto, que teria o mesmo efeito que o tráfego previsto sobre a estrutura do pavimento.

Para esta simulação foi adotado o valor de  $N = 1,974 \times 10^6$ , o qual pelo método de dimensionamento do DNIT (2006) exigiria uma espessura mínima de revestimento betuminoso de 5,0 cm.

Para o parâmetro clima adotou-se o da região de Minas Gerais, considerando a situação de uso do resíduo na região onde é gerado, fazendo com que a distância do transporte deste material fosse a menor possível.

Com relação ao nível de confiabilidade, é sabido que os parâmetros envolvidos no projeto de uma rodovia são de natureza probabilística. FRANCO (2007) define a confiabilidade como a probabilidade da serventia do pavimento permanecer em um nível adequado durante a vida de serviço, ou seja, é a probabilidade de um sucesso no projeto do pavimento. Tendo em vista esta definição, admitiu-se um nível de confiabilidade de 90%.

A TAB. 4.14 apresenta os valores de comportamento de Vida Útil da estrutura para as três misturas após a simulação no SisPav 2007, onde foi variado apenas os parâmetros da camada de revestimento e mantido constante todas as características das outras camadas.

TAB. 4.14 Resultados para Vida Útil das estruturas pelo SisPav.

MISTURA	ESPESSURA (m)	VIDA DE SERVIÇO ESTIMADA (ano)
M1	0,05	12,1
M2	0,05	12,8
M3	0,05	15,1

Observa-se, a partir dos resultados mostrados na TAB. 4.14, que todas as misturas simuladas obtiveram resultados muito próximos e todas resistiriam a mais de 10 anos, tempo este, estimado para a vida útil do pavimento, comprovando a possibilidade de utilização do revestimento onde a areia foi totalmente .

Na TAB. 4.15 é feita uma comparação entre o pavimento apresentado por GALHARDO (2015) e a mesma estrutura substituindo o revestimento betuminoso pela mistura M2 desta pesquisa.

TAB. 4.15 Comparação entre a estrutura do pavimento.

CAMADA	GALHARDO (2015)		MISTURA M2	
	MATERIAL	ESPESSURA (cm)	MATERIAL	ESPESSURA (cm)
Revestimento	CA Convencional	7,5	CA com resíduo	5,0
Base	BGS	36,0	BGS	20,0
Sub-base	50% Solo Residual Filito + 50% Resíduo	25,0	50% Solo Residual Filito + 50% Resíduo	25,0
Subleito	Solo fino	-	Solo fino	-

Observou-se que utilizando a mistura asfáltica com resíduo obteve-se uma redução na espessura da camada de revestimento e da base de brita graduada, além do aumento da capacidade de suporte ao tráfego, pois em GALHARDO (2015) utilizou-se  $N$  igual a  $2,5 \times 10^5$ , indicando o pavimento para uma rodovia de baixo volume de tráfego, enquanto que, nesta pesquisa, o  $N$  foi de  $1,974 \times 10^6$ , possibilitando a utilização desta estrutura em rodovias de tráfego do tipo médio.

Do exposto, pode-se concluir que o pavimento utilizando o resíduo apresentou resultados superiores em relação a uma mistura asfáltica que utiliza agregados convencionais. Comprovando assim, que este tipo de mistura com resíduo poderá ser utilizado como camada de revestimento em obras futuras.



### 4.3 DOSAGEM SUPERPAVE

Das três misturas dosadas pelo método Marshall e submetidas aos ensaios mecânicos, duas foram selecionadas (a mistura M1 contendo Brita1, Brita 0 e Areia e a mistura M2 onde a Areia foi substituída pelo Resíduo) para a compactação utilizando o compactador giratório Superpave (CGS) e a determinação do teor de projeto pelo método *Superpave*. Todos os procedimentos foram efetuados no Laboratório de Misturas Asfálticas da COPPE/UFRJ.

#### 4.3.1 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE PROJETO DA MISTURA M1

O teor de projeto do ligante obtido para a mistura M1 de 5,9% no método Marshall e a sua granulometria foi aproveitada como referência para a aplicação do método *Superpave*.

Na TAB. 4.16 está apresentada a variação dos teores de ligante a partir do 5,9% e todos os parâmetros médios em cada teor para a definição do teor de projeto. Foram executados 2 corpos de prova para cada teor apresentado.

TAB. 4.16 Parâmetros de dosagem *Superpave* obtidos para a mistura M1.

% LIGANTE	MASSA ESPECÍFICA		VV (%)	RBV (%)	VAM (%)	RPB (%)
	MEDIDA (Gmm) (kg/cm <sup>3</sup> )	APARENTE (Gmb) (kg/cm <sup>3</sup> )				
Referência (AASHTO M323-13)	-	-	4,0	65 - 78	TMN 19mm >13,0	0,6 – 1,2
4,4	2,563	2,388	6,8	52,2	14,3	1,1
4,9	2,502	2,378	4,9	67,3	15,1	0,8
5,4	2,473	2,430	1,7	87,3	13,7	0,7
5,9	2,463	2,422	1,7	88,5	14,5	0,7
6,4	2,455	2,432	0,9	93,6	14,6	0,6

A partir dos dados e utilizando os critérios apresentados na TAB. 4.16, pode-se então selecionar o teor de projeto através do gráfico da FIG. 4.9, onde o eixo “x” indica o teor de asfalto, no eixo “y1” está o %VV e no eixo “y2” está o %RBV.

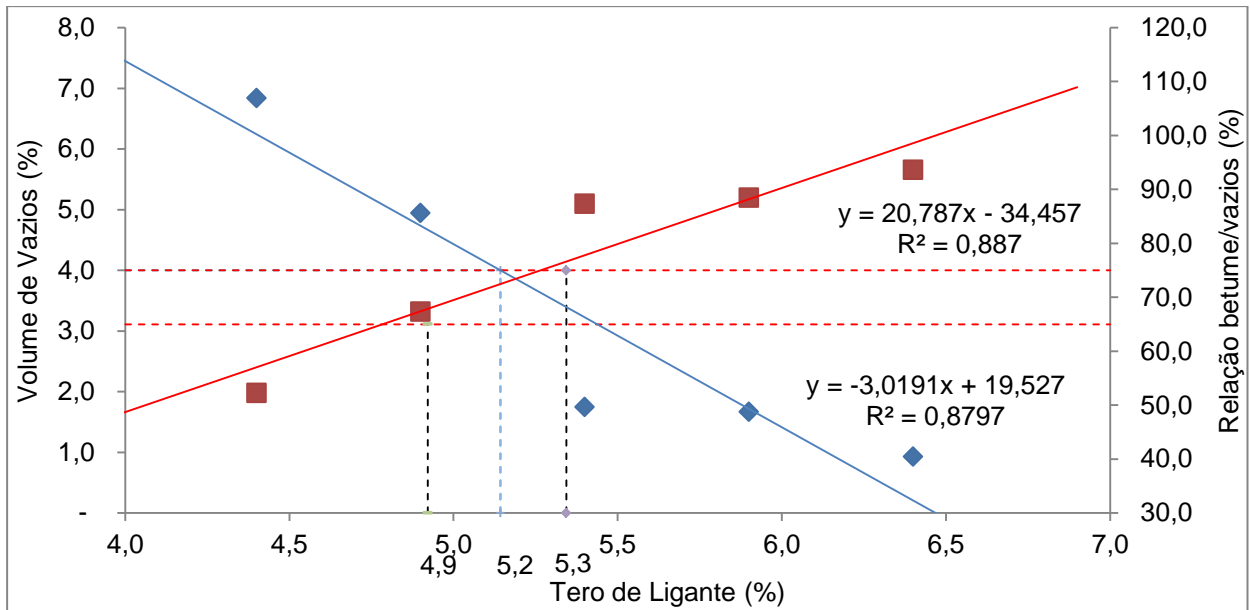


FIG. 4.9 Teor de asfalto versus Vv e RBV da mistura M1 do método *Superpave*.

A partir da TAB. 4.16 e da FIG. 4.9 pode-se observar que a mistura M1 terá como traço de projeto os valores apresentados na TAB. 4.17.

TAB. 4.17 Percentual do Teor de Projeto da mistura M1 pelo método *Superpave*.

MATERIAL	%
Teor de Ligante	5,2
Brita 1	19,0
Brita 0	37,9
Areia	37,9

#### 4.3.2 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE PROJETO DA MISTURA M2

Da mesma forma como feito para a mistura M1, utilizou-se o teor de projeto do ligante obtido para a mistura M2 de 5,6% no método Marshall e a sua granulometria foi aproveitada como referência para a aplicação do método *Superpave*.

Na TAB. 4.18 está apresentada a variação dos teores de ligante a partir do 5,6% e todos os parâmetros médios em cada teor para a definição do teor de projeto. Foram executados 2 corpos de prova para cada teor apresentado.

TAB. 4.18 Parâmetros de dosagem *Superpave* obtidos para a mistura M2.

% LIGANTE	MASSA ESPECÍFICA		VV (%)	RBV (%)	VAM (%)	RPB (%)
	MEDIDA (Gmm) (kg/cm <sup>3</sup> )	APARENTE (Gmb) (kg/cm <sup>3</sup> )				
Referência (AASHTO M323-13)	-	-	4,0	65 - 78	TMN 12,5mm >14,0	0,6 - 1,2
4,6	2,572	2,427	5,6	61,3	14,6	1,4
5,1	2,534	2,468	2,6	80,9	13,6	1,2
5,6	2,519	2,491	1,1	91,6	13,2	1,1
6,1	2,502	2,483	0,8	94,4	14,0	1,0

A partir dos dados e utilizando os critérios apresentados na TAB. 4.18, pode-se então selecionar o teor de projeto através do gráfico da FIG. 4.10, onde o eixo “x” indica o teor de asfalto, no eixo “y1” está o %VV e no eixo “y2” está o %RBV.

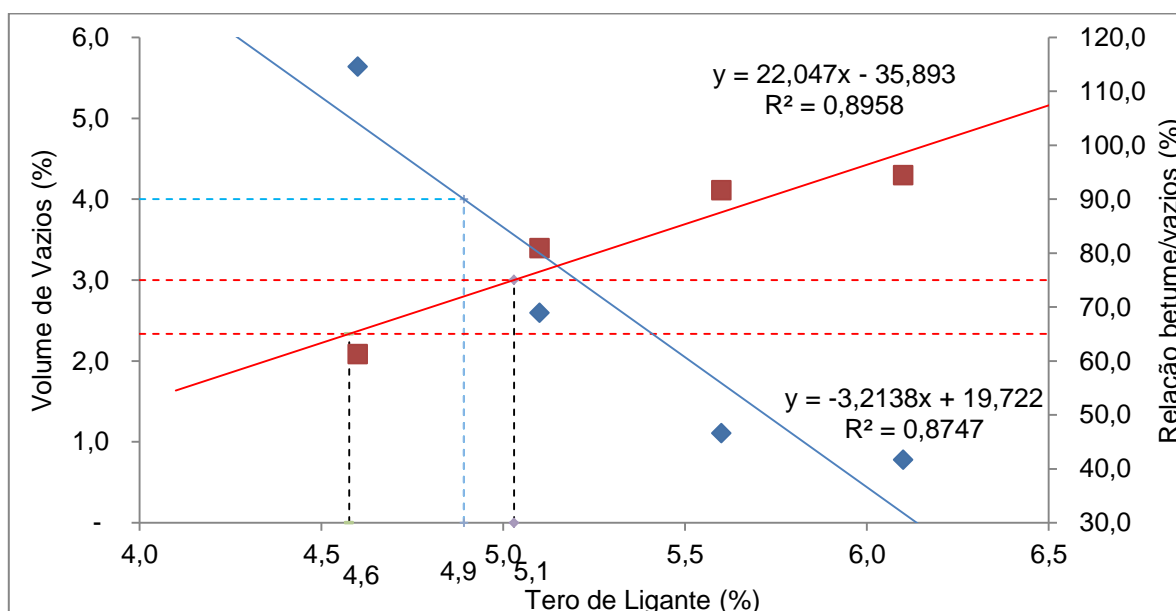


FIG. 4.10 Teor de asfalto versus Vv e RBV da mistura M2 do método *Superpave*.

A partir da TAB. 4.18 e da FIG. 4.10 pode-se observar que a mistura M2 terá como traço de projeto os valores apresentados na TAB. 4.19.

TAB. 4.19 Percentual do Teor de Projeto da mistura M2 pelo método *Superpave*.

MATERIAL	%
Teor de Ligante	4,9
Brita 1	14,3
Brita 0	61,8
Resíduo	19,0

#### 4.3.3 COMPARAÇÃO ENTRE AS MISTURAS

A partir dos teores de projeto de cada mistura, compactou-se, utilizando o compactador giratório *Superpave*, 2 corpos de prova a 160 giros para cada uma delas e obteve-se os parâmetros médios de projeto, os quais serão apresentados e comparados a seguir.

Na TAB. 4.20 estão apresentadas as propriedades volumétricas da mistura M1 e os critérios adotados pela norma AASHTO M323-13 para a definição do tipo de tráfego onde o concreto asfáltico poderá ser utilizado.

TAB. 4.20 Propriedades da mistura M1 pelo método *Superpave*.

PROPRIEDADES	RESULTADOS	CRITÉRIOS
TMN(mm)	19,0	19,0
%G <sub>mm</sub> @N <sub>ini</sub> = 7	88,0	≤ 90,5
%G <sub>mm</sub> @ N <sub>proj</sub> = 75	96,0	= 96
%G <sub>mm</sub> @ N <sub>max</sub> = 115	97,1	≤ 98
V <sub>v</sub> (%)	4,0	4,0 ± 1,0
RBV (%)	73,7	65 a 78
VAM (%)	15,2	> 13
Proporção pó/betume	0,7	0,6 a 1,2

Verifica-se, pela análise da TAB. 4.20, que a mistura M1 satisfaz a todos os critérios e pode ser utilizado em uma via com ESALs de 0,3 a 3 milhões, o que

corresponde a uma rodovia do tipo Coletora e com um volume de tráfego variando de baixo a médio.

Na TAB. 4.21 estão apresentadas as propriedades volumétricas da mistura M2 e os critérios adotados pela norma AASHTO M323-13 para a definição do tipo de tráfego onde o concreto asfáltico poderá ser utilizado.

TAB. 4.21 Propriedades da mistura M2 pelo método *Superpave*.

PROPRIEDADES	RESULTADOS	CRITÉRIOS
TMN(mm)	12,5	12,5
%Gmm @ Nini = 8	87,3	≤ 89
%Gmm @ Nproj = 100	96,0	= 96
%Gmm @ Nmax = 160	97,3	≤ 98
Vv (%)	4,0	4,0 ± 1,0
RBV (%)	72,6	65 a 75
VAM (%)	14,47	> 14
Proporção pó/betume	1,2	0,6 a 1,2

A partir dos resultados mostrados na TAB. 4.21, percebe-se que a mistura M2 atende a todos os critérios, podendo ser aplicado em uma via com ESALs de 3 a 10 milhões, o que representa uma rodovia do tipo Via Principal ou Rodovias Rurais, com um volume de tráfego variando de médio a alto.

Na TAB. 4.22 estão apresentados os valores finais dos traços de projeto com o teor ótimo de cada mistura para a metodologia *Superpave*.

TAB. 4.22 Resumo das características das misturas.

MISTURA	ESALs (x10 <sup>6</sup> )	TIPO	% MATERIAL				
			TEOR DE LIGANTE	BRITA 1	BRITA 0	AREIA	RESÍDUO
M1	0,3 a 3	Médio (rodovia coletora)	5,2	19,0	37,9	37,9	-
M2	3 a 10	Médio a alto (vias principais e rurais)	4,9	14,3	61,8	-	19,0

Tendo em vista o que foi apresentado pode-se concluir que a substituição do agregado miúdo pelo resíduo na mistura, além de se mostrar possível, fez com que com que a indicação de uso da mistura passasse de uma rodovia coletora, de tráfego médio (sem o resíduo), para uma rodovia principal e/ou rural, onde o tráfego é considerado de médio a alto (com o resíduo).

Quando se compara o teor ótimo de ligante nas misturas entre os métodos de dosagem, verifica-se que o teor da mistura M1 passou de 5,9% no método Marshall, para 5,2% no método *Superpave*, enquanto a mistura M2 passou de 5,6% (Marshall) para 4,9% (*Superpave*). Portanto, observou-se que a dosagem *Superpave* reduziu o teor de ligante de projeto em torno de 12% nas duas misturas, este fato já era esperado, tendo em vista, o processo de compactação empregado nos dois métodos.

#### 4.3.4 ÍNDICES DE COMPACTAÇÃO GIRATÓRIA

A partir dos teores ótimos das misturas foram confeccionados 02 corpos de prova de cada, compactados utilizando-se o compactador giratório *Superpave*, para obter os Índices de Compactação que permitem a extração de informações importantes que indicam o comportamento da mistura: o *Compaction Densification Index* (CDI), o *Traffic Densification Index* (TDI) o Ponto de Travamento dos Agregados (PTA), conforme apresentado por NASCIMENTO (2008).

As curvas de compactação das misturas realizadas no compactador giratório estão representadas nas FIG. 4.11 e FIG. 4.12, respectivamente.

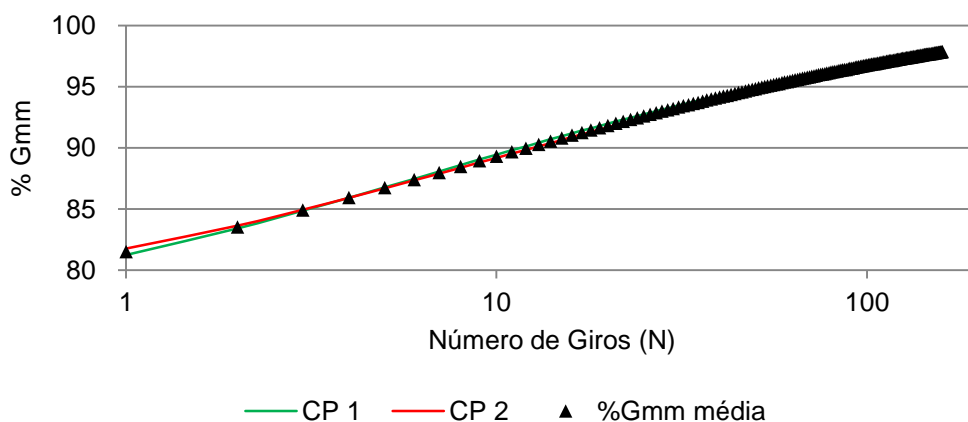


FIG. 4.11 Curva de compactação giratória da mistura M1.

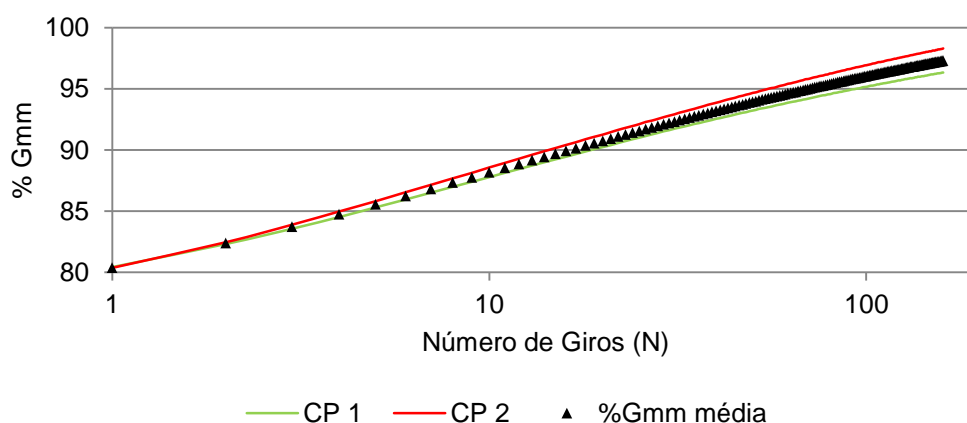


FIG. 4.12 Curva de compactação giratória da mistura M2.

A TAB. 4.23 apresenta os valores característicos de CDI, TDI e PTA das misturas retirados das curvas apresentadas, tais resultados foram obtidos através da média aritmética dos valores dos CPs ensaiados em cada mistura.

TAB. 4.23 Parâmetros retirados das curvas de compactação giratória.

MISTURA	CDI	TDI	PTA
M1	34	566	49
M2	61	451	53

Como parâmetro de comparação das misturas, utilizaram-se os valores contidos na TAB. 4.24 provenientes dos pesquisadores ali indicados.

TAB. 4.24 Valores de referência para os Índices CDI, TDI e PTA.

PROPRIEDADE	CARACTERÍSTICA DO TRÁFEGO		REFERÊNCIA
	MÉDIO	PESADO	
CDI	> 50		NASCIMENTO (2008)
TDI	> 250	> 400	
PTA	Entre 60 e 90 giros		VAVRIK e CARPENTER (1998)

Verificando os valores, apresentados na TAB. 4.24, observa-se que ambas as misturas dosadas, apresentam o valor de PTA abaixo do esperado, porém nota-se para a mistura M2, este valor é ligeiramente maior comparado ao da mistura M1.

Tendo em vista que este é um parâmetro ligado à composição dos agregados na mistura e não ao ligante (NASCIMENTO, 2008), conclui-se que com a mudança da Areia para o Resíduo a mistura melhorou em relação a este aspecto.

A análise do CDI e do TDI ajuda na predição do comportamento do esqueleto pétreo das misturas com relação aos parâmetros indicativos de deformação permanente do revestimento (MAHMOUD e BAHIA, 2004; NASCIMENTO, 2008). Com base nisto, verificou-se, segundo NASCIMENTO (2008), que a mistura M1 não se enquadraria para ser utilizada em rodovias de tráfego médio. Entretanto, a mistura M2 poderia ser empregada em rodovias de tráfego pesado, confirmando o que se constatou durante o processo de dosagem *Superpave*, onde a mistura M2 atendeu aos parâmetros de rodovia de tráfego de médio a alto. Portanto, pode-se afirmar que, com a substituição da areia pelo resíduo, o revestimento pode melhorar seu comportamento.

#### 4.3.5 ENSAIO UNIAXIAL DE CARGAS REPETIDAS

Para os ensaios uniaxiais de carga repetida para obtenção do valor de *Flow Number* foram compactados 03 CPs para cada mistura, com os procedimentos descritos no item de métodos. Após a modelagem das curvas de deformação, foram extraídos os valores de *FN*, e a deformação permanente no *FN* ( $\epsilon_p(FN)$ ), conforme a TAB. 4.25.

TAB. 4.25 Resultados do ensaio uniaxial de carga repetida (*FN*).

MISTURA	FN (ciclos)			b (microns/mm)		
	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	CV	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	CV
M1	327	136	42%	28,6	5,0	17%
M2	350	78	22%	34,6	1,4	4%

Observa-se, na TAB. 4.25, que a mistura M2 apresentou resistência ao dano por acúmulo de deformações permanentes, com maior valor de *Flow Number*. Além disto, obteve uma maior taxa de acúmulo de deformações na zona secundária, caracterizando uma pequena melhora em relação à mistura base.



Comparando os resultados das duas misturas em relação aos valores propostos por NASCIMENTO (2008), onde o FN @ 60° > 300 ciclos são indicados para Rodovia de Tráfego Médio e FN > 750 ciclos indicados para Rodovias de Tráfego Pesado, pode-se dizer que as misturas estudadas se enquadraram em rodovias de Tráfego Médio.

#### 4.3.6 PERDA POR UMIDADE INDUZIDA

Segundo BERNUCCI *et. al.*(2010) a avaliação do dano nas misturas asfálticas causado pela umidade é de grande importância, uma vez que afeta o desempenho e a vida de serviço dos pavimentos. O dano por umidade evidencia os possíveis problemas de adesividade agregado-ligante asfáltico.

Na TAB. 4.26 estão apresentados os valores deste ensaio assim como também o limite aceitável para este tipo de pavimento.

TAB. 4.26 Resumo dos valores do ensaio.

MISTURA	RT (MPa)	RTu (MPa)	RRT(%)	CRITÉRIO AASHTO MP 8-01
M 1	1,47	1,19	81%	> 70%
M 2	1,50	1,12	74%	

Verifica-se que as duas misturas atenderam um valor limite para este ensaio, portanto ambas apresentam pouca sensibilidade à ação deletéria da água.

#### 4.4 ANÁLISE COMPARATIVA ECONÔMICA

Esta análise comparativa se refere à composição unitária dos serviços de usinagem e execução de CAUQ, para tanto, foram utilizadas as composições de custo padrão segundo a metodologia do Sistema de Custo Rodoviário do DNIT - SICRO2 - com base no mês de julho de 2015 para a região de Minas Gerais, contendo os agregados naturais e o resíduo de beneficiamento de ferro.

#### 4.4.1 CUSTO UNITÁRIO TOTAL

A FIG. 4.13 apresenta a ficha de composição de custo da exploração do resíduo, ou seja, o custo de se retirar este material do local onde está depositado e transportá-lo para uma usina de asfalto, sua unidade de medida é m<sup>3</sup>/km.

DNIT - Sistema de Custos Rodoviários		Construção Rodoviária		SICRO2		
Custo Unitário de Referência		Mês : julho/2015		Minas Gerais		
Escavação, Carga e Transporte do Resíduo.		Produção da Equipe : 169,00 m <sup>3</sup> /km		(Valores em R\$)		
A - Equipamento	Quantidade	Utilização		Custo Operacional		Custo Horário
		Operativa	Improdutiva	Operativa	Improdutiva	
E016 Carregadeira de Pneus - 1,33 m <sup>3</sup> (79 kW)	1,00	0,11	0,89	122,26	22,42	33,40
E404 Caminhão Basculante - 10 m <sup>3</sup> - 15 t (170 kW)	1,00	1,00	0,00	140,52	18,23	140,52
Custo Horário de Equipamentos:						173,92
B - Mão-de-Obra	Quantidade			Salário-Hora	Custo Horário	
T701 - Servente	1,00			9,79	9,79	
Custo Horário da Mão-de-Obra:						9,79
Adc. M.O. - Ferramentas: 15,51%						1,52
Custo Horário de Execução:						185,23
Custo Unitário de Execução:						1,10
Custo Unitário Direto Total:						1,10
Lucro e Despesas Indiretas : 26,70%						0,29
Preço Unitário Total:						1,39

FIG. 4.13 Ficha de composição de custo do Resíduo.

Na FIG. 4.14 está representado o custo unitário do serviço de execução de 1 tonelada de CBUQ de capa de rolamento padrão do DNIT e na FIG. 4.15 está o custo unitário do serviço do mesmo serviço, porém com a substituição da areia pelo resíduo no traço do CBUQ.

DNIT - Sistema de Custos Rodoviários		Mês : julho/2015		Construção Rodoviária		SICRO2
Custo Unitário de Referência				Minas Gerais		RCTR0320
2 S 02 540 51 - CBUQ - capa rolamento AC/BC				Produção da Equipe : 75,00 t		(Valores em R\$)
A - Equipamento	Quantidade	Utilização		Custo Operacional		Custo Horário
		Operativa	Improdutiva	Operativa	Improdutiva	
E007 - Trator Agrícola - (74 kW)	1,00	0,24	0,76	72,71	16,81	30,23
E102 - Rolo Compact - Tandem vibrat. autoprop. 10,2 t (82kW)	1,00	0,56	0,44	114,31	16,81	71,41
E105 - Rolo Compactador - de pneus autoprop. 25 t (98 kW)	2,00	0,29	0,71	131,69	16,81	100,25
E107 - Vassoura Mecânica - rebocável	1,00	0,24	0,76	4,44	-	1,07
E149 - Vibro-acabadora de Asfalto - sobre esteiras (82 kW)	1,00	0,81	0,19	152,13	22,50	127,50
E404 - Caminhão Basculante - 10 m3 - 15 t (210 kW)	1,53	1,00	0,00	140,52	18,23	215,00
<b>Custo Horário de Equipamentos:</b>						<b>545,45</b>
B - Mão-de-Obra	Quantidade			Salário-Hora	Custo Horário	
T511 - Encarreg. de pavimentação	1,00			41,99	41,99	
T701 - Servente	8,00			9,79	78,30	
<b>Custo Horário da Mão-de-Obra:</b>						<b>120,29</b>
Adc. M.O. - Ferramentas: 15,51%						18,66
<b>Custo Horário de Execução:</b>						<b>684,41</b>
<b>Custo Unitário de Execução:</b>						<b>9,13</b>
C - Material/Atividade Auxiliar	Quantidade	Unidade	Preço Unitário		Custo Unitário	
Usinagem de CBUQ (capa de rolamento)- s/ material	1,0000	t	25,48		25,48	
Cimento asfáltico CAP 50/70	0,0550	t	1.124,47		61,85	
Brita Comercial	0,5580	m³	63,49		35,43	
Areia Comercial	0,0533	m³	83,67		4,46	
Filler	28,0000	kg	0,14		3,92	
<b>Custo Total do Material:</b>						<b>131,13</b>
<b>Custo Unitário Direto Total:</b>						<b>140,26</b>
Lucro e Despesas Indiretas : 26,70%						37,45
<b>Preço Unitário Total:</b>						<b>177,71</b>

FIG. 4.14 Ficha de composição de custo do CBUQ referência do DNIT.

DNIT - Sistema de Custos Rodoviários		Mês : julho/2015		Construção Rodoviária		SICRO2
Custo Unitário de Referência				Minas Gerais		RCTR0320
2 S 02 540 51 - CBUQ - capa rolamento AC/BC - com Resíduo				Produção da Equipe : 75,00 tkm resíduo		(Valores em R\$)
A - Equipamento	Quantidade	Utilização		Custo Operacional		Custo Horário
		Operativa	Improdutiva	Operativa	Improdutiva	
E007 - Trator Agrícola - (74 kW)	1,00	0,24	0,76	72,71	16,81	30,23
E102 - Rolo Compact - Tandem vibrat. autoprop. 10,2 t (82kW)	1,00	0,56	0,44	114,31	16,81	71,41
E105 - Rolo Compactador - de pneus autoprop. 25 t (98 kW)	2,00	0,29	0,71	131,69	16,81	100,25
E107 - Vassoura Mecânica - rebocável	1,00	0,24	0,76	4,44	-	1,07
E149 - Vibro-acabadora de Asfalto - sobre esteiras (82 kW)	1,00	0,81	0,19	152,13	22,50	127,50
E404 - Caminhão Basculante - 10 m3 - 15 t (210 kW)	1,53	1,00	0,00	140,52	18,23	215,00
<b>Custo Horário de Equipamentos:</b>						<b>545,45</b>
B - Mão-de-Obra	Quantidade			Salário-Hora	Custo Horário	
T511 - Encarreg. de pavimentação	1,00			41,99	41,99	
T701 - Servente	8,00			9,79	78,30	
<b>Custo Horário da Mão-de-Obra:</b>						<b>120,29</b>
Adc. M.O. - Ferramentas: 15,51%						18,66
<b>Custo Horário de Execução:</b>						<b>684,41</b>
<b>Custo Unitário de Execução:</b>						<b>9,13</b>
C - Material/Atividade Auxiliar	Traço	Distância(km)	Quantidade	Unidade	Preço Unitário	Custo Unitário
Usinagem de CBUQ (capa de rolamento)- s/ material			1,000	t	25,48	25,48
Cimento asfáltico CAP 50/70	5,60%		0,059	t	1124,47	66,34
Brita 1	14,16%		0,094	m³	63,49	5,99
Brita 0	61,36%		0,409	m³	63,49	25,97
Resíduo	18,88%	1,00	0,119	m³	1,39	0,17
<b>Custo Total do Material:</b>						<b>123,95</b>
<b>Custo Unitário Direto Total:</b>						<b>133,08</b>
Lucro e Despesas Indiretas : 26,70%						35,53
<b>Preço Unitário Total:</b>						<b>168,61</b>

FIG. 4.15 Ficha de composição de custo do CBUQ com resíduo.

Na TAB. 4.27 está apresentada uma comparando entre o custo da areia e o custo do resíduo do beneficiamento do minério de ferro pode-se concluir em um raio de 60 km de distância do depósito de resíduo o custo dos dois materiais se iguala. Observando que até esta distância a utilização do resíduo em substituição da areia é vantajosa tanto na área econômica quanto na área ambiental.

TAB. 4.27 Comparação de custo unitário do material utilizado nesta pesquisa.

DESCRIÇÃO	UNIDADE	VALOR
Areia - SICRO 2 - julho 2015 - MG	R\$/m <sup>3</sup>	83,67
Resíduo do beneficiamento	R\$/m <sup>3</sup> km	1,39
Distância	km	60

Na determinação da distância máxima de instalação da usina de asfalto optou-se por igualar o custo total da massa asfáltica padrão do SICRO com o custo da massa de CBUQ utilizando o traço da mistura M2, onde a areia é substituído totalmente pelo resíduo.

Observando as composições verifica-se que elas se diferem apenas no custo do material, portanto para a definição da distância desejada igualou-se estes valores, pois neste momento tem-se apenas o ganho ambiental pela substituição da areia pelo resíduo na fabricação do CBUQ. Na TAB. 4.28 estão apresentados os valores referentes ao cálculo da distância máxima de instalação da usina de asfalto desta pesquisa.

TAB. 4.28 Distância máxima de instalação da usina de asfalto, desta pesquisa.

DESCRIÇÃO	UNIDADE	CUSTO DO MATERIAL
CBUQ - SICRO 2	R\$/m <sup>3</sup>	131,13
CBUQ com resíduo	R\$/m <sup>3</sup> km	123,95
Distância	km	44

Entretanto, deve ficar claro que a distância de transporte dos agregados é variável em função do local da obra a ser realizada e que o escopo principal deste estudo comparativo foi o serviço de pavimentação em CBUQ para camada de rolamento.

Para o cálculo da quantidade de quilômetros que a produção diária de resíduo na mineradora SAMARCO poderá produzir utilizou-se um projeto hipotético onde se determinou a quantidade de resíduo presente em 1 km de CBUQ, estes valores estão apresentados na TAB. 4.29.

TAB. 4.29 Quantidade de resíduo em 1 km de CBUQ.

Projeto de 1 km de CBUQ com resíduo		
Descrição	Unidade	Valores
Comprimento	m	1.000,00
Largura (2 faixas de 3,50m)	m	7,00
Espessura da camada	m	0,05
Volume de CBUQ	m <sup>3</sup>	350,00
Densidade do CBUQ	t/m <sup>3</sup>	2,40
Peso do CBUQ	t	840,00
Percentual de resíduo no traço de CBUQ	%	20,00
Peso do resíduo	t	168,00
Densidade do resíduo	t/m <sup>3</sup>	2,40
Volume de resíduo em 1 km.	m <sup>3</sup>	108,81

Segundo a SAMARCO em novembro de 2015, a geração diária de resíduo de arenoso, utilizado nesta pesquisa, é de aproximadamente 47.000,00 m<sup>3</sup>, portanto seria possível produzir cerca de 280 km de pavimento igual ao do projeto hipotético por dia, mostrando com isso o grande potencial de utilização deste material como revestimento asfáltico.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS

Este trabalho teve como objetivo principal a avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas utilizando resíduo do beneficiamento do minério de ferro em substituição do agregado miúdo nas misturas asfálticas do tipo Concreto Asfáltico, visando seu emprego na camada de rolamento de um pavimento rodoviário.

Optou-se pela utilização da dosagem Marshall, por ser a atualmente prevista em norma pelo DNIT, órgão regulador de projetos de rodovias no Brasil, para verificar a possibilidade de substituição do agregado miúdo, no caso a areia, pelo resíduo do beneficiamento do minério de ferro, foram utilizadas três misturas integrantes do estudo comparativo do objetivo principal.

Em complemento, a dosagem *Superpave* foi usada para confirmar o comportamento previsto em duas dessas misturas e realizado uma comparação econômica da mistura de CAUQ com resíduo e a utilizado pelo DNIT no seu Sistema de Custo Rodoviário.

Pode-se concluir que a utilização do resíduo do beneficiamento do minério de ferro em misturas asfáltica do tipo Concreto Asfáltico é viável e traz benefícios técnicos, econômicos e principalmente ambientais.

Deste modo, segue algumas conclusões observadas nesta pesquisa após as etapas previstas no escopo da pesquisa.

Todos os materiais foram caracterizados e as seguintes conclusões foram apontadas:

- a) Do ponto de vista da composição granulométrica, o resíduo do beneficiamento do minério de ferro mostrou ser uma areia classificada de média a fina, sendo que sua composição química e mineralógica, que podem diferenciá-las das areias convencionais, não gerou significativa mudança nas misturas asfálticas projetadas ratificando a possibilidade de sua utilização nas mesmas;

- b) Os resultados dos ensaios de Equivalente Areia e Durabilidade do resíduo apresentaram-se satisfatórios se comparados aos critérios exigidos pela norma vigente. Em relação ao ensaio de Vazios sem Compactação que é parâmetro seletivo de material, na metodologia *Superpave* o resíduo apresentou resultado acima do mínimo, permitindo assim, a sua utilização como agregado também para este método de dosagem;
- c) Do ponto de vista da adesividade do agregado em relação ao ligante asfáltico, CAP 50/70, os resultados do ensaio se mostraram não satisfatórios, caracterizando com isso, a necessidade de utilização um produto melhorador de adesividade, este procedimento já é utilizado com frequência no meio rodoviário;
- d) No tocante a granulometria das misturas, observa-se que todas estas foram enquadradas na faixa C do DNIT e não houve a necessidade de inclusão de fíler artificial nas mesmas, em virtude das características granulométricas dos materiais;

A mistura M2 confeccionada com um teor de 20% de resíduo apresentou características físicas e mecânicas compatíveis com a mistura asfáltica padrão (M1), e própria para ser utilizada em um tráfego de médio a leve, sendo, portanto, aprovada para aplicação prática. Há possibilidade do aumento do teor de resíduo, desde que, se possam flexibilizar os limites da faixa granulométrica utilizadas pelo órgão fiscalizador e sejam realizados ensaios comprovando os resultados.

Após a submissão dos corpos de prova aos diversos ensaios propostos na metodologia de dosagem Marshall, ficaram evidentes as seguintes análises:

- a) As características físicas e mecânicas das composições das misturas estudadas são compatíveis com os critérios da norma do DNIT. Além disto, observou-se que com a utilização do resíduo como agregado miúdo obteve-se uma diminuição de 5% no teor de CAP na mistura, passando de 5,9% na

M1 para 5,6 na M2. A diminuição do teor de ligante, além de diminuir o custo do revestimento, resolve um problema ambiental;

- b) Houve também, uma melhora no percentual de Volume de Vazios, que passou de 3,1% na M1 para 3,9% na M2, porém ocorreu uma perda da estabilidade, de 1710 kgf na M1 para 1361 kgf na M2, provavelmente por ser uma mistura com características mais fina. Entretanto, sabe-se que o ensaio de estabilidade Marshall não representa de maneira adequada o desempenho no campo das misturas asfálticas, estando cada vez mais em desuso, apesar de ainda previsto em norma; e
- c) Uma simulação numérica do comportamento estrutural de um pavimento utilizando o SisPav versão 2007, indicou um comportamento compatível com uma estrutura de pavimento convencional. Este fato contribuiu para ratificação da possibilidade da utilização do resíduo como integrante na camada de revestimento em projetos futuros.

Tal como apresentado no capítulo de metodologia, os procedimentos da determinação do teor ótimo pela metodologia *Superpave* e os ensaios propostos por estas, podemos analisar as seguintes observações:

- a) Pode-se concluir que a substituição do agregado miúdo pelo resíduo na mistura, além de ser possível, fez com que a nova mistura se enquadrasse em uma rodovia do tipo tráfego médio a alto e indicado para vias principais e rurais, enquanto que a mistura padrão se enquadrava em rodovias coletoras, onde o tráfego é menor;
- b) Analisando os Índices de Compactação Giratória confirmou-se o que se constatou durante o processo de determinação do teor ótimo do método *Superpave*, onde a mistura com resíduo atendeu aos parâmetros de rodovia de tráfego de médio a alto segundo NASCIMENTO (2008) e VAVRIK e



CARPENTER (1998). Portanto, afirma-se que, com a substituição da areia pelo resíduo, o revestimento obteve uma melhora do seu comportamento; e

- c) No ensaio Uniaxial de Cargas Repetidas a mistura com resíduo apresentou uma maior resistência ao dano por acúmulo de deformações permanentes, com um maior valor de *Flow Number* (sendo 327 ciclos para M1 e 350 ciclos para M2). Além disto, obteve-se uma maior taxa de acúmulo de deformações na zona secundária (5,0 para M1 e 1,4 para M2), caracterizando uma pequena melhora em relação à mistura base. Comparando os resultados das duas misturas em relação aos valores propostos por NASCIMENTO (2008) pode-se dizer que esta mistura se enquadra em rodovias de tráfego médio, confirmando mais uma vez este fato observado anteriormente.

Com a análise de custo pode-se comprovar que até uma distância de 44 km poderia ser instalado uma usina de asfalto para produzir CBUQ com vantagens econômicas e ambientais.

Para a ampliação da ótica observada por este estudo, alguns trabalhos futuros podem ser conduzidos para a confirmação e melhoria dos resultados apresentados, a saber:

- a) Desenvolver novos traços com agregados oriundos da região em que o resíduo é produzido, permitindo assim a confirmação dos resultados aqui apresentados;
- b) A construção de trechos experimentais para que seja possível a observação do desempenho deste material na prática, possibilitando a ratificação ou retificação dos resultados obtidos nesta pesquisa; e
- c) Utilizar o método *Bailey* para ajustar a granulometria dos agregados, permitindo assim melhorar o comportamento das misturas com resíduo.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO M323-13. **Standard specification for Superpave volumetric mix design.** American Association of State Highway and Transportation Officials, 2013.
- AASHTO MP 8-01. **Standard specification for designing stone matrix asphalt (SMA).** American Association of State Highway and Transportation Officials, 2005.
- AASHTO R35-15. **Standard practice for Superpave volumetric design for asphalt mixture.** American Association of State Highway and Transportation Officials, 2015.
- AASHTO T116. **Standard method of test for bulk specific gravity (Gmb) of compacted hot-mix asphalt (HMA) using saturated surface-dry specimens.** American Association of State Highway and Transportation Officials, 2013.
- AASHTO T283. **Standard method of test for resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage.** American Association of State Highway and Transportation Officials, 2014.
- AASHTO T304. **Uncompacted Void Content of Fine Aggregate. (As influenced by particle shape, surface texture, and grading).** American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008.
- ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Relatório de Ensaio Nº 85528/2010-1.0 - Objeto declarado: Rejeito de minério de Fe da Samarco Mineração - Amostra nº: 168261.** Laboratório ABCP, São Paulo, SP, 2013.
- ABECASSIS, F; CABRAL, N. **Análise econômica e financeira de projetos.** 4. ed. Lisboa: Fund C Gulbenkian. 2000, 296 p.
- ABNT NBR 10004:2004. **Resíduos Sólidos - Classificação.** Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004.
- ABNT NBR 10006:2004. **Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduo sólido.** Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004.
- ABNT NBR 14855:2015. **Ligantes asfálticos – Determinação da solubilidade em tricloroetileno.** Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015.
- ABNT NBR 15184:2004. **Materiais betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional.** Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004.

- ABNT NBR 15617:2015. **Determinação do dano por perda umidade induzida.** Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015.
- ABNT NBR 16018:2011. **Determinação da Rigidez por Compressão Diametral Sob Carga Repetida.** Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2011.
- ABNT NBR 6296:2012. **Produtos betuminosos semissólidos – Determinação da massa específica e densidade relativa.** Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012.
- AL-ROUSAN, T. M. **Characterization of aggregate shape properties using a computer automated system.** These de Ph.D. Dissertation, Texas A&M University, College Station, Texas, USA, 2004.
- ANP. Resolução n. 19 de 11. Jul. 2005. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.
- ANTOSCZEZEM JUNIOR, J. A. **Desenvolvimento dos revestimentos asfálticos produzidos com asfaltos modificados por polímeros e borracha de pneus no Brasil.** Boletim Técnico 2012. 7. ed. Sindicato da Indústria da Construção Pesada do Estado de São Paulo, São Paulo, 2012.
- ARAGÃO, F. T. S. **Effects of aggregates on properties and performance of mastics and superpave hot mix asphalt mixtures.** Dissertação de Mestrado, University of Nebraska - Lincoln, USA, 2007.
- ASPHALT INSTITUTE. **The Asphalt Handbook.** Edição 1989. Asphalt Institute (MS-4). Lexington, KY, EUA, 1989.
- ASTM D2041. **Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures.** American Society of Testing and Materials, 2011.
- ASTM D2872. **Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Filme f Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test).** American Society of Testing and Materials, 2013.
- ASTM D4791. **Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate.** American Society of Testing and Materials, 2005.
- BAHIA, H. & FAHEEM, A. F. **Using the Superpave gyratory compactor to estimate rutting resistance of hot-mix asphalt.** Transportation Research Circular EC 124, Practical approaches to hot-mix asphalt mix design and production quality control testing. Washington, 2007.
- BAHIA, H.U.; FRIEME, T.P.; PETERSON, P.A. et al., **Optimization of Constructibility and Resistance to Traffic: A New Design Approach for HMA**

- Using the Superpave Compactor.** In: Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 67, pp. 189-232, Washington, D.C., EUA, 1998.
- BALAGUER, M. **Avaliação estrutural de um pavimento flexível executado em asfalto-borracha elaborado pelo processo de produção *continuous blend*.** Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ. 2012.
- BARRETO, M.L. **Mineração e desenvolvimento sustentável: Desafios para o Brasil.** CETEM-MCT. Rio de Janeiro. 2001. Disponível em: <http://pubs.iied.org/pdfs/G00580.pdf>.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro: PETROBRÁS/ABEDA, 2010.
- BESSA, I.S. **Avaliação do processamento digital de imagens como ferramenta para caracterização de agregados e misturas asfálticas.** Dissertação de Mestrado em Engenharia, Universidade Federal do Ceará, 2012.
- 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.
- BOSCOV, M.E.G. **Geotecnia Ambiental.** São Paulo: Oficina de Textos, 2008. p. 185-207.
- BROUSSEAUD, Y.; DELORME, J.L.; HIERNAUX, R. **Study of permanent deformations in asphalt with help of the LCPC Whell Tracking rutting tester: evaluation and future prospects.** In: Transportation Research Board Annual Meeting, 72, Washington. Anais... Washington: Transportation Research Board, 1993.
- BUARQUE, C. **Avaliação econômica de projetos: uma apresentação didática.** Rio de Janeiro: Campus, 2 ed.1991, 266 p.
- 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.
- CAMPANHA, A. **Caracterização de rejeitos de minério de ferro para uso em pavimentação.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Viçosa. 2011.

- CASTELO BRANCO, V.T.F.; MASAD, E.; LITTLE, D.; SOARES, J.B.; MOTTA, L.M.G. **Caracterização de forma, angularidade e textura de agregado de brita granítica e escórias de aciaria usando o Aggregate Imaging System (AIMS)**. In: Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, 21, 2007, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2007.
- CAVALCANTI, L.S. **Efeito de alguns modificadores de ligante na vida de fadiga e deformação permanente de misturas asfálticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, 2010.
- COELHO, E.F.F. **Estudos do comportamento mecânico de rejeitos de minério de erro reforçados com fibras sintéticas**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, Ouro Preto, MG. 2008.
- CONTADOR, C.R. **Projetos sociais – avaliação e prática**. 4ª edição. São Paulo: Editora Atlas, 2010.
- DNER-ME 035/1998. **Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1998.
- DNER-ME 043/1995. **Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 1995.
- DNER-ME 054/1997. **Equivalente de areia**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 1997.
- DNER-ME 078/1994. **Agregado graúdo – adesividade a ligante betuminoso**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 1994.
- DNER-ME 081/1998. **Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1998.
- DNER-ME 083/1998. **Agregados – análise granulométrica**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1998.
- DNER-ME 084/1995. **Agregado miúdo – determinação da densidade real**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1995.
- DNER-ME 089/1994. **Agregados – avaliação da durabilidade pelo emprego de solução de sulfato de sódio ou de magnésio**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994.
- DNER-ME 148/1994. **Material betuminoso – determinação dos pontos de fulgor e de combustão (vaso aberto Cleveland)(ABNT-NBR 11341)**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994.

- DNER-ME 163/1998. **Materiais betuminosos – determinação da ductilidade.** Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1998.
- DNER-ME 399/1999. **Agregados – determinação da perda ao choque no aparelho Treton.** Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1999.
- DNIT 031/2006 – ES. **Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço.** Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2006.
- DNIT 095/2006 – EM. **Cimentos asfálticos de petróleo – Especificação de material.** Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2006.
- DNIT 131/2010 – ME. **Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola - Método de ensaio.** Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2010.
- DNIT 135/2010 – ME. **Pavimentação Asfáltica – Mistura Asfálticas - Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio.** Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2010.
- DNIT 136/2010 – ME. **Pavimentação Asfáltica – Mistura Asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio.** Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2010.
- DNIT 155/2010 – ME. **Material asfáltico – Determinação da penetração – Método de ensaio.** Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2010.
- DNIT. **Manual de Pavimentação.** 3a edição – Rio de Janeiro, RJ – Brasil, 2006.
- DNPM – DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Informe Mineral – 2015 1º Semestre**, Novembro de 2015. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/dnpm/informes/informe-mineral-2015-1o-semester/view>  
Acesso em: 10 de novembro de 2015.
- FERNANDES, G. **Comportamento de Estruturas de Pavimentos Ferroviários com Utilização de Solos Finos e/ ou Resíduos de Mineração de Ferro Associados a Geossintéticos.** Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, UnB, Brasília. 2005.
- FERREIRA, R.F. **Dimensionamento de um Pavimento Experimental para Tráfego de Caminhões Fora-de-Estrada em Planta de Mina.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 2007.
- FONTES, L.P.T.L.; TRICHÊS, G.; PAIS, J.C.; PEREIRA, P.A.A. **Evaluating permanent deformation in asphalt rubber mixtures.** Construction and Building Materials, v. 24, p. 1193-1200, 2010.

- FRIBER, M.A. **Estudo da viabilidade de utilização do agregado calcinado contendo resíduo de mineração na utilização em camadas de pavimento.** Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ. 2015.
- GALHARDO, D.C. **Estudo sobre a viabilidade técnica da utilização de rejeito de mineração de ferro em camadas de pavimentos rodoviários.** Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ. 2015.
- GITMAN, L.J. **Princípios de administração financeira.** 10ª Ed. São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2004.
- GOMES, R.C. **Caracterização Tecnológica e Sistemas de Disposição de Rejeitos.** Publicação do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, 2007. p. 180.
- GOUVEIA, L.T. **Avaliação do ensaio de angularidade do agregado fino (FAA) da especificação Superpave.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Paulo, 2002.
- HAND, A.J.; STIADY, J.L.; WHITE, T.D.; NOURELDIN, A.S.; GALAL, K. **Gradation effects on HMA performance.** In: Transportation Research Board Annual Meeting, 80, Washington. Anais... Washington: Transportation Research Board, 2001.
- HIRSCHFELD, H. **Engenharia Econômica.** 4ª ed. São Paulo, Editora Atlas, 1989.
- HUBER, G.A. Methods to achieve rut-resistant durable pavements. **Synthesis of Highway Practice 274.** National Cooperative Highway Research Program. Transportation Research Board. Washington, DC. 1999.
- IBRAM - INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Informação e Análise da Economia Mineral Brasileira,** 7ª Edição, Dezembro de 2012. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br>>. Acesso em: 10 de outubro de 2015.
- IBRAM - INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Informações sobre a Economia Mineral Brasileira 2015,** Outubro de 2015. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br>>. Acesso em: 10 de novembro de 2015.
- KAMEL, N.I & MILLER, L.J. Comparative performance of pavement mixes containing conventional and engineered Asphalts. **Transportation Research Record 1454** - Transportation Research Board, Washington, D.C, EUA, 1994.
- 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.

- LIMA, L.F. **A escolha da taxa de desconto na análise custo benefício**. Monografia de Bacharel em Ciências Econômicas. Universidade de Brasília, UnB, Brasília, 2013.
- LIMA, R.X. **Logística da Distribuição de Materiais em Pavimentação Rodoviária – Uma Modelagem em Programação Matemática**. Dissertação Mestrado. Fortaleza, 2003.
- LUZ, A.B & LINS, F.A.F. **Introdução ao Tratamento de Minérios - Tratamento de Minérios**, 4ª Edição, Revisada e Ampliada, CETEM-MCT, 2004.p.3.
- MAGALHÃES, S.T. **Misturas asfálticas de módulo elevado para pavimentos de alto desempenho**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, 2004.
- MAHMOUD, A.F.F. & BAHIA, H. Using the gyratory compactor to measure mechanical stability of asphalt mixtures. **Wisconsin Highway Research Program 0092-01-02**. Madison, 2004.
- MARQUES, G.L.O. **Utilização do módulo de resiliência como critério de dosagem de mistura asfáltica; efeito da compactação por impacto e giratória**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, 2004.
- MASAD, E.; AL-ROUSAN, T.; BUTTON, J.; LITTLE, D.; TUTUMLUER, E. **Test methods for characterizing aggregate shape, texture and angularity**. National Cooperative Highway Research Program – NCHRP, NCHRP Final Report, National Academy Press, Washington, 2005.
- MASAD, E.A.; REZAEI, A.; HOWDHURY, A. & HARRIS, P. **Predicting asphalt mixture skid resistance based on aggregate characteristics**. FHWA/TX-09/0-5627-1, 2009.
- MEDINA, J. & MOTTA, L.M.G., **Mecânica dos Pavimentos**. 2ª Edição, Editora UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.
- MOMM, L. **Estudos dos efeitos da granulometria sobre a macrotextura superficial do concreto asfáltico e seu comportamento mecânico**. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, 1998.
- MONTE, M.B.M; SAMPAIO, J.A; SCHNELLRATH, J & LADEIRA, W; **Ferro- Mina Mariana – SAMARCO – Livro Usina de Beneficiamento de Minérios de Brasil**. CETEM – Centro de Tecnologia Mineral, Rio de Janeiro, 2002.
- MONTE, M.B.M; SAMPAIO, J.A; SCHNELLRATH, J; LADEIRA, W. & GALINARI, C. **Samarco, usinas de beneficiamento de minérios no Brasil**. CETEM, Rio de Janeiro, 2001. 329-339p.



- MOTA, S. **Introdução à engenharia ambiental**. 4<sup>a</sup> ed, Rio de Janeiro: ABES, 2006.
- MOURA, E. **Estudo de deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas em pista e em laboratório**. Tese de Doutorado em Engenharia de Transportes – Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, 2010.
- MOURÃO, J.M. **Estudo prospectivo do Setor Siderúrgico: Caderno de Informações de Base**. Associação de Metalurgia e Materiais, ABM, Brasília: CGGE, 2008.
- NASCIMENTO, F.A.C. **Estudo comparativo sobre deformação permanente em misturas asfálticas a partir de ensaios de tração indireta e simulador de tráfego**. Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ. 2015.
- NASCIMENTO, L.A.H. **Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, 2008.
- ONOFRE, F.C.; BESSA, I,S; CASTELO BRANCO, V.T.F. & SOARES, J.B. **Correlação entre variáveis de densificação do compactador giratório e resistência à deformação permanente de misturas asfálticas convencionais e com resíduos**. In: Transportes, v. 19, n.1, p. 13-22, 2011.
- ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Crescimento e evolução. Pautas básicas para o desenvolvimento rural**. Roma, Itália. Grupo de trabalho sobre o desenvolvimento rural do Comitê Administrativo de Coordenação 1984.
- PAZOS, A.G. **Efeitos de propriedades morfológicas de agregados no comportamento mecânico de misturas asfálticas**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, 2015.
- PERDOMO, D.; BUTTON, J. W. & LYTTON, R. L. **A new approach for prediction of permanent deformation. In: Effect of aggregates and mineral fillers on asphalt mixture performance**, ASTM STP 1147, Philadelphia, EUA, 1992.
- PEREIRA, K.L. **Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos**. Dissertação de Mestrado, UFRN, Natal, RN, 2012. 125 p.
- PINTO, S. & MOTTA, L.M.G. Catálogo de curvas de fadiga. **Boletim Técnico 16**. Associação Brasileira de Pavimentação, ABPV, Rio de Janeiro, 1995.
- PINTO, S. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 1991.

- PINTO, S.S.S. **Caracterização das propriedades físicas e mecânicas de misturas de diferentes tipos de rejeito para aplicação em pavimentos.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Viçosa. 2013.
- PONTE, R.S.; CASTELO BRANCO, V.T.F.; HOLANDA, A.S. & SOARES, J.B. **Avaliação de diferentes metodologias para obtenção do módulo de resiliência de misturas asfálticas.** Associação de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET, 2013.
- PRESOTTI, E.S. **Influência do Teor de Ferro nos Parâmetros de Resistência de um Rejeito de Minério de Ferro.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 2002. 153p.
- PROWELL, B.D. & BROWN, E.R., **Superpave mix design: verifying gyration levels in the Ndesign table,** National Cooperative Highway Research Program – NCHRP Report 573, Washington, D. C., EUA, 2007.
- RESENDE, L.R.M. **Capacidade de Suporte de Praias de Rejeitos Granulares de Mineração e Construção de Aterros Compactados.** Dissertação de Mestrado em Engenharia de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, Ouro Preto, MG. 2012.
- RIBEIRO, L.F.M. **Simulação Física do Processo de Formação dos Aterros Hidráulicos Aplicados à Barragens de Rejeitos.** Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, UnB, Brasília. 2000. 232p.
- RIBÓ, J. **Gerenciamento de Resíduos e Certificação Ambiental** / [Coord.] FRANKENBERG, C. L. C.; RAYA-RODRIGUES, M. T.; CANTELLI, M. – Porto Alegre. EDIPUCRS. 2000.
- ROBERTS, F.L.; KANDHAL, P.S.; BROWN, E.R.; LEE, D.Y. & KENNEDY, T.W. **Hot mix asphalt materials, mixture, design and construction.** 2 ed. Lanham, Maryland, Napa Education Foundation, 1996.
- ROBINETTE, C. & WILLIAMS, R. C., **The effects of testing history and preparation method on the Superpave Simple Performance Test.** In: Journal of the association of asphalt paving technologists, Vol. 75, pp. 297-320, Savannah, Georgia, EUA. 2006.
- RODRIGUES, W.C. **Estudo sobre a viabilidade técnica e econômica da utilização de resíduo industrial de ardósia em mistura asfáltica do tipo pré-misturado a frio.** Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ. 2011.
- SAMITRI S.A. **Mineração da Trindade. Mina de Alegria: Sistema de deposição de rejeitos sólidos. Aspectos ambientais do projeto.** Enge-Rio, Rio de Janeiro. 1989. 39 p.

- SANTOS, G.P.P. **Um estudo sobre a utilização da escória de ferroníquel em pavimento rodoviário**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia, 2013.
- SARAIVA, S.L.C. **Metodologia e Análise Experimental do Comportamento Geotécnico da Estrutura de Pavimentos Rodoviários**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 2006.
- SEBAALY, P.E.; RIDOLFII, D.; RAJA, S. et al. **Selecting most desirable hotmix asphalt mixtures**. Transportation Research Record 1590, Transportation Research Board, Washington, D.C, EUA, 1997.
- SILVA FILHO, A.F. **Contribuição ao estudo do desempenho de concreto produzido com agregado graúdo de escória de ferro-cromo**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2001.
- SILVA, R.G.O. **Estudo laboratorial do desempenho mecânico de misturas asfálticas com resíduos industriais de minério de ferro**. Dissertação de Mestrado - Programa de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, Ouro Preto/MG, 2010.
- SOUZA, A.F. **Avaliação de investimentos: uma abordagem prática**. São Paulo, ed. Saraiva, 2007.
- SPECHT, L.P. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (PPGEC/UFRGS). Porto Alegre, RS, Brasil, 2004.
- STAKSTON, A.D. **The effect of fine aggregate angularity, asphalt content and performance graded asphalts on hot-mix asphalt performance in a laboratory study**. Master of Engineering - University of Wisconsin, 2002.
- SUKHWANI, R.; LITTLE, D.N.; MASAD, E. **Sensitivity of HMA performance to aggregateshape measured using conventional and image analysis methods**. TTI Report 0-1707-5, Texas Transportation Institute, College Station, TX, 2006.
- TIETENBERG, T. & LEWIS, L. **Environmental & Natural Resources Economics**. 9. ed. Prentice Hall, 2011.
- VAVRIK, W. R.; CARPENTER, S. H., **Calculating air voids at specified numbers of gyrations in superpave gyratory compactor**. In: Transportation Research Record 1630: Asphalt Mixtures: Stiffness Characterization, Variables, and Performance, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., EUA, 1998.

- WITCZAK, A.T. **Avaliação e análise paramétrica do ensaio de compressão diametral sob cargas repetidas em misturas asfálticas.** Dissertação de Mestrado em Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Brasil, 2006.
- WITCZAK, M. W. Simple performance tests: summary of recommended methods and database. National Cooperative Highway Research Program – NCHRP, **NCHRP Report 547**, National Academy Press, Washington, 2005.
- WITCZAK, M.W.; KALOUSH, K.; PELLINEN, T.; EL-BASYOUNY, M.; VON QUINTUS, H. **Simple performance test for Superpave mix design.** NCHRP Report 465. Transportation Research Board. Washington, D.C., 2002.
- ZHANG, J.; ALVAREZ, A.L.; LEE, S.I.; TORRES, A.; WALUBITA, L.F. **Comparison of flow number, dynamic modulus, and repeated load tests for evaluation of HMA permanent deformation.** Construction and Building Materials, v. 44, p. 391-398, 2013.
- ZHUANG, J., LIANG, Z., LIN, T., DE GUZMAN, F. **Theory and practice in the choice of social discount rate for cost-benefit analysis: a survey.** ERD Working Paper Series no.94. ADB, 2007.