



Programa de Pós-Graduação em Engenharia
de Recursos Naturais da Amazônia

PREPARAÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO DE ASFALTO MODIFICADO POR MADEIRA/BORRACHA: EXECUÇÃO EM PISTA EXPERIMENTAL EM MACAPÁ-AP

JOHNNY GILBERTO MORAES COELHO

Tese de doutorado para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia de Recursos Naturais, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará - UFPA. Área de concentração Materiais e Processos de Fabricação.

Orientadores: Prof. Dr. Andre Luiz Amarante Mesquita.

Prof^a. Dr^a. Carmen Gilda Barroso Tavares

Dias.

Belém, PA

Setembro de 2019

1

**ATA DA 85ª SESSÃO DE
APRESENTAÇÃO E DEFESA DE
TESE DE DOUTORADO DO
PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
DE RECURSOS NATURAIS DA
AMAZÔNIA.**

2 Ata da 85ª sessão de apresentação e defesa de tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em
3 Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia para a concessão do Grau de Doutor em Engenharia de
4 Recursos Naturais na área de Uso e Transformação de Recursos Naturais, realizada às quinze horas do
5 dia seis de setembro de dois mil e dezenove, no Auditório do PRODERNA. A tese de doutorado
6 intitulada **"PRERAÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO DE ASFALTO MODIFICADO POR
7 MADEIRA/BORRACHA: EXECUÇÃO EM PISTA EXPERIMENTAL EM MACAPÁ-AP"**, foi apresentada
8 durante 50 minutos pelo candidato **Johnny Gilberto Moraes Coelho** diante da banca examinadora
9 aprovada pelo colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da
10 Amazônia do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, assim constituída: **Prof. Dr.
11 André Luiz Amarante Mesquita (Orientador – PRODERNA/UFPA), Prof.ª Dr.ª Carmem Gilda Barroso
12 Tavares Dias (Coorientadora – PRODERNA/UFPA), Profa. Dra. Cecília Amélia de Carvalho Zavaglia
13 (UNICAMP), Prof. Dr. Alcebiades Negrão Macêdo (Membro – FEC/ITEC/UFPA), Prof. Dr. Marcos Allan
14 leite dos Reis (Membro – PRODERNA/UFPA), Prof. Dr. Claudio José Cavalcante Bianco (Membro –
15 PRODERNA/UFPA).** Em seguida, o candidato foi arguido oralmente pelos membros da banca
16 demonstrando suficiência de conhecimentos e capacidade de sistematização no tema objeto da tese,
17 favorecendo a banca examinadora a apresentar contribuições para tese e
18 decidir pela Aprovação da mesma, _____ e
19 conceder o prazo máximo de um mês (30 dias) para serem incorporadas as sugestões propostas pela
20 banca. Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata que é assinada pelos integrantes da banca
21 examinadora e pelo candidato.

Belém, 06 de Setembro de 2019.

PRESIDENTE: _____

MEMBROS: _____

CANDIDATO: _____
Johnny Gilberto Moraes Coelho

**PREPARAÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO DE ASFALTO
MODIFICADO POR MADEIRA/BORRACHA: EXECUÇÃO EM PISTA
EXPERIMENTAL EM MACAPÁ-AP**

Johnny Gilberto Moraes Coelho

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS DA AMAZÔNIA (PRODERNA/ITEC) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS.

Aprovada por:

Prof. Dr. Andre Luiz Amarante Mesquita (Orientador)

Prof^ª. Dr^ª. Carmen Gilda Barroso Tavares Dias (Co-orientadora)

Prof. Dr. Alcebiades Negrão Macêdo

Prof. Dr. Marcos Allan Leite dos Reis

Prof. Dr. Claudio José Cavalcante Blanco

Prof^ª. Dr^ª. Cecilia Amélia de Carvalho Zavaglia

Belém, PA - Brasil

Setembro de 2019

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Instituto de Tecnologia/Programa de Pós-graduação em
Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia
Marlen Amaral CRB₂ 1354

C672p Coelho, Johnny Gilberto Moraes, 1985-
Preparação, caracterização e aplicação de asfalto
modificado por madeira/borracha: execução em pista
experimental em Macapá-AP / Johnny Gilberto Moraes
Coelho. – Belém, 2019.

Orientador: Andre Luiz Amarante Mesquita.
Coorientadora: Carmen Gilda Barroso Tavares Dias.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Pará,
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, Belém,
2019.

1. Asfalto ecológico. 2. Resíduo de madeira dura. 3.
Revestimento asfáltico. 4. Concreto betuminoso usinado a
quente (CBUQ). I. Título.

CDD 22. ed. 690

AGRADECIMENTOS

Aos professores da UFPA que foram fundamentais para o acontecimento deste trabalho, prof. André Mesquita e prof^a. Carmen Dias.

Ao corpo técnico da empresa ETECON LTDA., CIPASA Urbanismo, docentes do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFPA (PPGEM-UFPA) e em Engenharia Civil da UFPA (PPGEC-UFPA), pelos conhecimentos compartilhados e a atenção dos mesmos, e aos demais professores que de forma direta ou indireta contribuíram com a elaboração deste trabalho.

Aqueles que trabalham no laboratório de ecompositos da Engenharia Mecânica da UFPA e do Instituto Federal de Tecnologia do Amapá - IFAP.

Agradeço também aos técnicos do Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Naturais da UFPA (PRODERNA-UFPA), pelos ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV.

Ao CNPq e CAPES pelo incentivo a pesquisa.

*Trabalhe para manter viva em seu
peito aquela pequena faísca de fogo
celestial, chamada consciência.*

George Washington

Resumo da Tese apresentada ao PRODERNA/UFPA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia de Recursos Naturais (D.Eng.).

**PREPARAÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO DE ASFALTO
MODIFICADO POR MADEIRA/BORRACHA: EXECUÇÃO EM PISTA
EXPERIMENTAL EM MACAPÁ-AP**

Johnny Gilberto Moraes Coelho

setembro/2019

Orientadores: Prof. Dr. Andre Luiz Amarante Mesquita.

Prof^a. Dr^a. Carmen Gilda Barroso Tavares Dias.

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Para amenizar os prejuízos ocasionados ao meio ambiente, empresas estão adotando asfaltos com materiais reciclados, denominados por asfalto ecológico, não aplicado na Amazônia e na linha do equador por falta de estabilidade do asfalto. O objetivo principal deste trabalho é a avaliação tecnológica da inserção de resíduo de madeira dura de uso na construção civil associada à borracha de pneu reutilizada aplicável na construção de revestimentos asfálticos. Foi gerada a patente BR102016006187-3, para preparar o composto madeira/borracha. O ligante asfáltico utilizado foi o cimento asfáltico de petróleo CAP 50/70 produzido pela PETROBRAS, é oriundo do campo Fazenda Alegre, no estado do Espírito Santo e processado pela LUBNOR em Fortaleza, Ceará. Os agregados pétreos foram fornecidos pela empresa ETECOM LTDA. A graduação utilizada para as misturas foi a Faixa C do DNIT. O projeto das misturas asfálticas convencionais e com incorporação de madeira/borracha foram definidos e analisados seguindo a metodologia Marshall. As características e comportamento das misturas resultaram em estabilidade e resistência à tração diametral superior ao valor mínimo normatizado, em quatro e em duas vezes respectivamente, com um pequeno ganho para misturas com o composto, sem alteração significativa na densidade aparente e a relação betume-vazios. Entretanto para atingir o mesmo volume de vazios e não comprometer a durabilidade do revestimento foi necessário 40% a mais de energia de

compactação. A substituição de uma parte dos agregados minerais pelo composto madeira/borracha faz com que a flexibilidade da mistura asfáltica aumente com aumento na resistência à tração e redução no módulo de resiliência de misturas concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ). Para as misturas asfálticas projetadas, a menor relação módulo de resiliência e resistência à tração (M_r/R_t) desejada, foi obtida com a inserção de madeira/borracha no valor de 5159,26 (adimensional), comparado com o convencional no valor de 6607,67 (adimensional). Os trechos experimentais foram aplicados a temperatura em torno de 165 °C para misturas asfálticas convencionais e de 170 °C para misturas com uso de modificadores, não apresentando dificuldades adicionais. O trecho experimental com asfalto ecológico apresentou maior estabilidade (10,43 kN) em comparação ao asfalto convencional (8,48 kN) após 50 meses de uso em Macapá-AP.

Palavras-chave: CBUQ, madeira dura, asfalto ecológico.

Abstract of Thesis presented to PRODERNA/UFGA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Natural Resources Engineering (D.Eng.).

**PREPARATION, CHARACTERIZATION AND APPLICATION OF
WOOD/RUBBER-MODIFIED ASPHALT ON AN EXPERIMENTAL ROAD IN
MACAPÁ, AMAPÁ STATE, BRAZIL**

Johnny Gilberto Moraes Coelho

september/2019

Advisor: Prof. Dr. Andre Luiz Amarante Mesquita.

Prof^a. Dr^a. Carmen Gilda Barroso Tavares Dias.

Research Area: Materials and Manufacturing Processes.

In order to mitigate environmental damage, companies have begun to use eco-friendly asphalt made from recycled material, which cannot be applied in the Amazon region or along the equator due to its instability. The primary objective of this study is to conduct a technology evaluation of combining hardwood waste used in civil construction with reused tire rubber for application in asphalt paving. A patent was generated (BR102016006187-3) to prepare the wood/rubber compound. A local petroleum asphalt cement binder was used (CAP 50/70), produced by PETROBRAS at the Fazenda Alegre field in Espírito Santo state and processed by LUBNOR in Fortaleza, Ceará state. The stone aggregates used were supplied by ETECOM LTDA. The grading curve used for the mixtures was range C, in line with the National Department for Transport Infrastructure (DNIT). The conventional asphalt and wood/rubber-modified mixtures were designed and analyzed in accordance with the Marshall method. The characteristics and behavior of the mixtures resulted in stability and tensile strength four and two-fold greater, respectively, than the normalized minimum value, with a small gain for the wood/rubber-modified mixtures and no significant change in apparent density or air void content. However, 40% more compaction energy was needed to achieve the same void volume without compromising asphalt durability. Replacing a portion of the mineral aggregates with the wood/rubber compound increased the flexibility of the asphalt mixture with a rise in tensile strength and decreased modulus of

resilience in the hot-mix asphalt concrete (HMA) mixtures. For the asphalt mix designs, the desired low modulus of resilience to tensile strength ratio (RM/TS) was obtained by inserting wood/rubber at a value of 5159.26 (dimensionless), compared with the conventional value of 6607.67 (dimensionless). The experimental roads were paved at around 165 °C for the conventional asphalt mixtures and 170 °C for their modified counterparts, with no additional difficulties. The road paved with eco-friendly asphalt exhibited better stability (10.43 kN) than conventional asphalt (8.48 kN) after 50 months of use in Macapá, Amapá state (AP), Brazil.

Keywords: HMA, hardwood, eco-friendly asphalt.

SUMÁRIO

CAPITULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 PROBLEMAS AMBIENTAIS	1
1.2 CONDIÇÕES DA MALHA RODOVIÁRIA NACIONAL	3
1.3 ASFALTOS ECOLÓGICOS	6
1.4 JUSTIFICATIVA	9
1.5 OBJETIVOS	9
1.5.1 Objetivo geral	9
1.5.2 Objetivos específicos	10
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO	10
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 MADEIRAS DURAS EM ENGENHARIA	12
2.2 LEGISLAÇÃO VERSUS REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS EM ASFALTOS	13
2.3 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL E AS PERSPECTIVAS FUTURAS NO SETOR DA CONSTRUÇÃO	15
2.4 MISTURAS ASFÁLTICAS USUAIS EM PAVIMENTAÇÃO	16
2.5 OS REJEITOS DE CONSTRUÇÃO NO BRASIL	18
2.6 BORRACHAS INSERIDAS EM ASFALTOS	20
2.7 MISTURAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS COM RESÍDUOS SÓLIDOS	22
2.8 ASFALTOS MODIFICADOS COM BORRACHA	24
CAPITULO 3 – PROGRAMA EXPERIMENTAL	25
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	25
3.2 PLANEJAMENTO DO PROJETO	25
3.3 PROJETO DO EXPERIMENTO	27
3.3.1 Projetos: geométrico, drenagem superficial, rede de água, rede de esgoto	27
3.3.3.1 Definição da estrutura do pavimento	27
3.4 MATERIAIS USADOS NA PESQUISA	33
3.4.1 Ligante asfáltico	33
3.4.1.1 Agregados	33
3.4.2 Borracha	34
3.4.3 Madeira	35

3.5	TESTES DE CISALHAMENTO OSCILATÓRIO	36
3.6	ENSAIOS DE LABORATÓRIO	39
3.6.1	Microscopia Eletrônica de Varredura com Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios X	39
3.6.2	Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral	41
3.6.3	Ensaio de Estabilidade Marshall	41
3.6.4	Módulo de resiliência (MR)	42
3.6.5	Resistência a tração (RT)	44
3.7	PROJETOS DE MISTURA ASFÁLTICA	45
3.7.1	Composição granulométrica e dosagem Marshall	45
3.7.2	Dosagem Marshall	46
	CAPITULO 4 – EXECUÇÃO DA PISTA EXPERIMENTAL	50
4.1	INFRAESTRUTURA	50
4.2	REVESTIMENTO ASFÁLTICO CONVENCIONAL	50
4.3	REVESTIMENTO ASFÁLTICO COM INCORPORAÇÃO DE BORRACHA RECICLADA DE PNEUS	51
4.4	EXTRAÇÃO DE CORPO-DE-PROVA ASFÁLTICO EM CAMPO	56
	CAPITULO 5 – ENSAIOS DE LABORATÓRIO	58
5.1	ANÁLISE DE CISALHAMENTO OSCILATÓRIO	58
5.2	PROPRIEDADES VOLUMÉTRICAS	60
5.3	ESTABILIDADE E FLUÊNCIA	62
	CAPITULO 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
6.1	MÓDULO DE RESILIÊNCIA E RESISTÊNCIA A TRAÇÃO	64
6.2	RESISTÊNCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	66
	CAPITULO 7 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES	68
7.1	CONCLUSÕES	68
7.2	SUGESTÕES	70
	REFERÊNCIAS	71
	ANEXO I – Perfis de sondagem a trado	80
	ANEXO II – Compactação e CBR do Subleito	83
	ANEXO III – Limite de liquidez e plasticidade	88
	ANEXO IV – Traço de C.B.U.Q. Convencional e Extração em pista	91
	ANEXO V – Traço de C.B.U.Q. Modificado Extração em pista	96

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 -	Nomes aceitos de espécies por região brasileira	12
Figura 2.2 -	Percentagem em massa de vários constituintes dos resíduos sólidos urbanos em dez cidade da região sudeste	19
Figura 2.3 -	Composição da coleta seletiva no Brasil	19
Figura 2.4 -	Quantificação em massa da origem dos RCC no Brasil	20
Figura 3.1 -	Vista panorâmica do conjunto condominial em estudo	26
Figura 3.2 -	Chuva acumulada x chuva (normal climatológica 61-90) em Macapá-AP no ano de 2019	29
Figura 3.3 -	Temperatura em Macapá-AP no ano de 2019	29
Figura 3.4 -	Análise granulométrica do subleito natural	32
Figura 3.5 -	Pavimento asfáltico em estudo	33
Figura 3.6 -	Distribuição granulométrica dos agregados	34
Figura 3.7 -	Borracha reciclada de pneu moída utilizada na pesquisa	35
Figura 3.8 -	Análise granulométrica da Borracha de pneu e resíduo de madeira dura em estudo	36
Figura 3.9 -	Fluidos viscosos em teste dinâmico mecânico	38
Figura 3.10 -	Microscopia eletrônica de varredura de amostras de madeira/borracha aumento de x1000 (a), x500 (b), x500(c) e x100	40
Figura 3.11 -	Gráfico da análise elementar do composto madeira/borracha	41
Figura 3.12 -	Representação do equipamento para ensaio de módulo de resiliência	42
Figura 3.13 -	Composição granulométrica dos agregados convencionais sem e com madeira/borracha	43
Figura 3.14 -	Propriedades das misturas asfálticas convencional e incorporada com borracha reciclada de pneus e resíduo de madeira dura	48
Figura 4.1 -	Mistura asfáltica: usina de asfalto móvel CYBER, descarregamento de asfalto em caminhão basculante 6x4 (a); silos usina de asfalto Kompak 500 (b)	51
Figura 4.2 -	Aquecimento dos materiais usados na pavimentação: Betoneira usada para confecção do composto (a); inserção de calor no sistema e betoneira (b); Composto produzido (c)	52
Figura 4.3 -	Composto madeira/borracha: material em estoque (a); Composto madeira/borracha transportado através das correias da usina gravimétrica(b)	52
Figura 4.4 -	Fluxograma da confecção do composto madeira/borracha	53
Figura 4.5 -	Mistura asfáltica de asfalto com composto madeira/borracha	53
Figura 4.6 -	Pavimentação de trecho urbano com asfalto convencional e modificado ..	53
Figura 4.7 -	Vibroacabadora usada na pavimentação “in loco”	54

Figura 4.8 -	Rolo pneumático usado na pavimentação	54
Figura 4.9 -	Asfalto madeira/borracha e asfalto convencional	55
Figura 4.10	Gerenciamento do pavimento em estudo, durante 50 meses	56
Figura 4.11	Extração de corpo-de-prova em campo para ensaio de extração de - betume	57
Figura 5.1 -	Viscosidade (η (γ)) em função da taxa de cisalhamento; amostras $7R^3$, $7R^{4,5}$, $7R^6$, $7,5R^3$, $7,5R^{4,5}$, $7,5R^6$, $8R^3$, $8R^{4,5}$ e $8R$	58
Figura 5.2 -	Viscosidade (η (γ)) em função da taxa de cisalhamento; amostras $7R^3$, $7R^{4,5}$, $7R^6$, $7,5R^3$, $7,5R^{4,5}$, $7,5R^6$, $8R^3$, $8R^{4,5}$ e $8R$	59
Figura 5.3 -	Gráfico de volume de vazios (VV), vazios do agregado mineral (VAM) e relação betume vazios (RBV) de asfaltos convencionais e com composto madeira/borracha	61
Figura 5.4 -	Ensaio de estabilidade e fluência em corpo-de-prova de asfalto madeira/borracha	62
Figura 5.5 -	Gráfico de estabilidade, fluência e relação estabilidade/fluência de asfalto convencionais e com a incorporação de composto madeira/borracha	63
Figura 6.1 -	Módulo de resiliência e relação de módulo de resiliência e resistência à tração	65
Figura 6.2 -	Resistência à tração (25°C)	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 -	Quantidade transportada por modalidade	3
Tabela 1.2 -	Matriz do Transporte de Cargas	4
Tabela 1.3 -	Estado geral das rodovias	4
Tabela 1.4 -	Estado do pavimento	5
Tabela 1.5 -	Investimento necessário	5
Tabela 3.1 -	Fator regional climático segundo o DNER, manual de pavimentação	28
Tabela 3.2 -	Tráfego “in loco”	30
Tabela 3.3 -	Classificação e característica do subleito	32
Tabela 3.4 -	Resultados dos ensaios de índices físicos	32
Tabela 3.5 -	Características físicas do CAP 50/70 utilizado neste estudo	33
Tabela 3.6 -	Características dos agregados utilizados	34
Tabela 3.7 -	Dosagem composta para testes de reologia CAP 50/70 e S/B/arenoso ...	36
Tabela 3.8 -	Granulometria dos agregados para mistura asfáltica convencional na faixa especificada pelo DNIT	45
Tabela 3.9 -	Granulometria dos agregados para mistura asfáltica com madeira/borracha na faixa especificada pelo DNIT	46
Tabela 3.10 -	Propriedades das misturas asfálticas	47
Tabela 4.1 -	Informações relacionadas à execução do trecho com concreto asfáltico convencional	51
Tabela 4.2 -	Informações relacionadas à execução do trecho com concreto asfáltico não convencional	55
Tabela 5.1 -	Propriedades de asfaltos convencionais e com incorporação do composto madeira/borracha	61
Tabela 5.2 -	Valores de estabilidade, fluência e relação estabilidade/fluência dos concretos asfálticos convencional e com incorporação de composto madeira/borracha	63
Tabela 6.1 -	Módulos de Resiliência, Resistência à Tração e Relação Módulo de Resiliência e Resistência à Tração dos corpos-de-prova moldados	64

LISTA DE ABREVIATURA

ANTT	Agencia Nacional de Transportes Terrestres
BR	Rodovia
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
cm ²	centímetro quadrado
CNT	Confederação Nacional de Transportes
CPA	Camada Porosa de Asfalto
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EUA	Estados Unidos da América
FC	Fator de Equivalência de Carga
FE	Fator de Eixos
FR	Fator Climático Regional
h	Hora
hab.	Habitação
Hot	Teor de Umidade Ótimo
HRB	Highway Research Board
IG	Índice de Grupo
IP	Índice de Plasticidade
ISC	Índice de Suporte Califórnia
ISP	Índice de suporte de projeto
kg	Quilograma
Km	Quilometro
kN	Quilonewton
LL	Límite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
LVDT	Linear variable differential transformer

mm	Milímetros
MN	Meganewton
Mr	Módulo de Resiliência
MR	Módulo de Resiliência
Mr/Rt	Relação do Módulo de Resiliência e Resistência à Tração
P	Periodo em anos
PE	Polietileno
PP	Polipropileno
R\$	Reais
RBV	Relação Betume Vazios
RCC	Resíduo da Construção Civil
Rt	Resistência à Tração
S	Serragem
T	Taxa de Crescimento Anual do Tráfego, 46; Toneladas
TKU	Toneladas Transportadas por Quilômetro Útil
V	Média passagens Diária
V1	Volume Médio Diário de Tráfego no Ano de Abertura
VAM	Vazios do Agregado Mineral
Vm	Volume Médio Diário de Trafego, 43; Volume Médio Diário de Tráfego
Vv	Volume de Vazios

LISTA DE SÍMBOLOS

γ_s	Peso Específico do Solo Seco
Δ	Deformação Elástica ou Resiliente
$^{\circ}\text{C}$	Grau Celsius
μ	Coefficiente de Poisson
G^*	Módulo de rigidez
$\dot{\gamma}$	Taxa de deformação
$\dot{\gamma}$	Taxa de cisalhamento
τ	Tensão de cisalhamento
δ	Ângulo de fase

CAPITULO 1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo, faz-se uma reflexão a respeito da degradação do meio ambiente, o transporte rodoviário no Brasil, a fabricação de asfaltos com materiais poliméricos e elastoméricos. Assim como a justificativa e organização deste trabalho.

1.1 PROBLEMAS AMBIENTAIS

A administração de recursos naturais é uma questão muito discutida atualmente na gestão ambiental. Os recursos naturais podem ser classificados em dois grupos: recursos renováveis e recursos não-renováveis. Para a manutenção dos organismos, populações e ecossistemas o controle responsável dos recursos naturais é fundamental.

A história da industrialização mundial evidencia o papel preponderante do desenvolvimento tecnológico no processo de mudanças radicais que ocorreram nas sociedades humanas, social e financeiramente (STUERMER, 2017).

Diante deste pensamento, o crescimento econômico baseado num padrão tecnológico intensivo no uso de matérias primas e energia (MAHDIKHANI; KHANBAN, 2019), principalmente proveniente de hidrocarbonetos – grandes demandantes de recursos naturais – podem esbarrar nos limites da finitude dos recursos ambientais. E os recursos não renováveis estão na mira dos cientistas devido ao grande prejuízo que podem ocasionar ao meio ambiente, modelos de previsões multimodais são bastante utilizados para mitigar tal problemática (SEMENYCHEV *et al.*, 2017).

O desenvolvimento tecnológico é um dos vetores fundamentais que possibilita o crescimento econômico e é, em grande parte, guiado pelo interesse privado em obter benefício econômico em curto prazo (SILVA; DE BRITO; DHIR, 2019), assim como benefícios ambientais aos seus usuários, este depende da visão holística de quem constrói ou se faz melhor uso do espaço integrado aos sistemas existentes (VIOLA, 2017). Ambos os processos, crescimento econômico e desenvolvimento tecnológico, são descontínuos, não lineares e evoluem no tempo, caracterizados por apresentar interdependência temporal, onde tanto a história quanto seus eventos e desdobramentos recentes são importantes.

Em Gupta (2017), obra na qual se fez estudo de materiais ecológicos, com baixo consumo de recursos naturais e usando materiais verdes, esse princípio reflete o ponto de partida para a conscientização global visando à preservação dos recursos

naturais de forma equilibrada, como uma tarefa nas quais empresas e empreendedores no ramo da construção civil devem se engajar. Portanto, com o passar dos tempos, foram dados os primeiros passos para o despertar da necessidade de um desenvolvimento sustentável.

Nos países chamados de "os países em desenvolvimento", as condições dos ecossistemas estão longe de ser primitivas. Os processos de urbanização e os riscos são partilhados com os países desenvolvidos, mas com diferentes vulnerabilidades (LEÓN; ROBLES, 2002). A indústria da construção usa grandes quantias de matérias-primas de forma que envolvem alto consumo de energia. A possibilidade de melhoria e orientações no fornecimento para a seleção de materiais na concepção ecológica é de suma importância (WANG *et al.*, 2019a). A reutilização e reciclagem dos resíduos de demolição torna-se difícil, separar os diferentes materiais, e muitos deles terminam em aterros sanitários e ou incineradores. Portanto, para ser possível a reciclagem de materiais de construção, é necessário promover uma mudança radical na concepção da indústria da construção civil, facilitada através da desmontagem dos materiais de construção no final da sua vida útil. Para este efeito, as articulações entre os diferentes materiais devem ser reversíveis, evitando na medida do possível, adesão de uma ou mais peças para facilitar a separação dos materiais de construção civil (BRIBIÁN; CAPILLA; USÓN, 2011).

O subsequente desenvolvimento econômico-tecnológico, baseado no uso intensivo da matéria prima e energia, aumentou a velocidade de utilização dos recursos naturais. Esses efeitos negativos sobre o meio ambiente foram resultados de ações e decisões passadas, sugerindo uma interdependência temporal, regulando um processo de mudanças contínuas e evidenciando incertezas e mudanças ao reconhecimento dos impactos ambientais, oriundos do crescimento econômico sem paradigmas socioambientais.

O aumento contínuo da produção requer uma maior quantidade de recursos naturais e implica no aumento dos rejeitos no meio ambiente (PSZCZOŁA *et al.*, 2017). Esse aumento está associado ao crescimento da população humana, portanto, ao aumento da demanda e também do sistema de produção capitalista (LUSTOSA, 1999).

Esta produção de rejeitos esta vinculada ao descarte de materiais, a borracha de pneu, por exemplo, tem um prazo vida útil determinado de no máximo de 15 anos de duração, porém sua decomposição ocorre após anos, período indeterminado, mais preciso cerca de 6 séculos. Daí vem uma forma não convencional de aplicação de

asfaltos que vem ganhando espaço no ramo da pavimentação em vários estados brasileiros, a inserção de borracha de pneu em asfaltos.

Os valores elevados de viscosidade, ponto de amolecimento e recuperação elástica do asfalto-borracha fazem com que ele sofra menos danos do tráfego e das intempéries, proporcionando maior vida útil ao pavimento do que o asfalto convencional. Essa diferença fica na casa dos 40%, o que também reduz a necessidade de reparos na pista, ajudando a manter a via com maior fluidez de tráfego de veículos. Outra vantagem do asfalto-borracha é a redução do tempo de liberação da pista ao tráfego em relação à execução com asfalto tradicional. Reduz o ruído na passagem de veículos pelas vias com asfalto-borracha (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Em Macapá, estado Brasileiro alvo deste estudo, tem-se dois pontos de coleta de pneus inservíveis cadastrados, com capacidade para 6 mil unidades de pneu, no ano de 2015 (IBAMA, 2016). Segundo a reportagem do Diário do Amapá (PREFEITURA..., 2017), a Prefeitura de Macapá retirou das ruas 250 toneladas de pneus em 2017 e passa por várias fases de trituração em Minas Gerais. A etapa final é uma massa asfáltica, que tem mais resistência.

1.2 CONDIÇÕES DA MALHA RODOVIÁRIA NACIONAL

O transporte rodoviário no Brasil é o principal meio de transporte, quer de pessoas ou de mercadorias. Segundo dados da Agencia Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) no ano de 2007 (Tabela 1.1) 55,3% da quantidade (tonelada) transportada e 61,1% do total transportado (Tabela 1.2) medidos em tonelada x quilômetro foram feitos por rodovia. Deve-se atentar para o fato de que do volume transportado por ferrovias, a maior parte se refere a um único produto, minério de ferro, em grande parte destinada a exportação que, se excluído do total transportado no país, aumenta ainda mais a participação do transporte rodoviário na vida brasileira (PEGÔ, 2016).

Tabela 1.6 - Quantidade transportada por modalidade.

Quantidade Transportada (toneladas)						
Modal	Rodoviário		Ferroviário	Aquaviário	Aeroviário	Total
	Transportadoras	Outras Cargas				
Total	584111894	553071440	465465851	450860049	1318614	2054827828
%	55,30		22,70	21,90	0,06	100,00

Fonte: ANTT

Tabela 1.7 – Matriz do Transporte de Cargas

Matriz do Transporte de Cargas		
Modal	Milhões (TKU)	Participação (%)
Rodoviário	485625	61,1
Ferroviário	164809	20,7
Aquaviário	108000	13,6
Dutoviário	33300	4,2
Aéreo	3169	0,4
Total	794903	100

Fonte: CNT, 2014.

A confederação Nacional de Transportes (CNT) realiza todos os anos uma pesquisa para avaliar as condições da malha rodoviária nacional. No ano de 2007 foram vistoriados 87592 km dos quais 58812 são federais e 28780 estaduais. Do total inspecionado, 76756 km estão sob gestão pública e 10836 km são administradas sob regime de concessões.

Das rodovias pesquisadas (Tabela 1.3) 26,1% estão em estado bom/ótimo e 73,9% se inserem no estado regular/ruim ou péssimo.

Tabela 1.8 - Estado geral das rodovias.

Estado Geral das Rodovias		
Estado Geral	Km	Percentual
Ótimo	9211	10,5
Bom	13682	15,6
Regular	35710	40,8
Ruim	19397	22,1
Péssimo	9592	11
Total	87592	100

Fonte: CNT, 2014.

O estado do pavimento observado (Tabela 1.4) demonstra que das rodovias inspecionadas, 45,5% estão em estado ótimo/bom e 54,5% apresentam estado regular/ruim ou péssimo. Isso se dá devido à falta de zelo com as estradas, manutenção das vias, assim Gonçalves, Mendes e Oliveira (2017) promovem em sua publicação, a servitização dos serviços de manutenção de transportes. E com o crescimento da frota de automóveis no País, conseqüente revitalização urbana agregada, pode-se gerar mais estudos quanto o aumento da malha modal e rodoviária existente no País, duplicação de

vias, para o escoamento de produtos e serviços (TAVARES; ANDRADE; MAIA, 2017).

Tabela 1.9 - Estado do pavimento.

Estado dos Pavimentos			
Estado Geral	Km	Percentual	Percentual boa/má conservação
Ótimo	34132	39	45,5
Bom	5683	6,5	
Regular	31384	35,8	54,5
Ruim	9442	10,8	
Péssimo	6951	7,9	
Total	87592	100	100

Fonte: CNT (2014)

A pesquisa da CNT estimou também o montante de recursos necessários (Tabela 1.5) para recuperar rodovias, de acordo com os serviços a serem efetuados, devem seguir as seguintes modalidades:

- Reconstrução (Trechos totalmente destruídos): Operações que necessitem de trabalhos que englobem base, leito e subleito.
- Restauração (Trechos com buracos, ondulações e afundamentos, pavimentos ruim e regular): Adição ou substituição total ou parcial de camadas estruturais em pontos localizados, de forma que a estrutura resultante restabeleça as condições originais da rodovia em termos de segurança e conforto.
- Manutenção (Trechos desgastados, pavimento bom): Operações destinadas a manter as rodovias em condições técnicas e operacionais favoráveis.

Tabela 1.10 - Investimento necessário.

Investimentos Necessários para Recuperação do Pavimento (2014)			
Tipo de Serviço	km	Custo/km	Total R\$ x 10 ⁹
Reconstrução (trechos totalmente destruídos – pavimento péssimo)	6951	R\$ 750.000,00	5,2
Restauração (trechos buracos, ondulações e afundamentos – pav. ruim e regular)	40826	R\$ 420.000,00	17,1
Manutenção (trechos desgastados – pavimento bom)	5683	R\$ 190.000,00	1,02
Total	53460	-	23,4

Fonte: CNT (2014)

Em 2018, os leilões estão previstos nas BRs 364 e 365 (Goiás e Minas Gerais) e nas BRs 101, 116, 290 e 386 (Rio Grande do Sul) para a ampliação da capacidade e a melhoria do nível de serviço das vias. A adoção do sistema de “gatilho” inova o modelo de outorga de rodovias, uma vez que a duplicação dos trechos ficará condicionada ao aumento do fluxo de tráfego e às regras previstas em contrato. A expectativa é que o aporte de capital, vinculado à comprovada necessidade, resultará em menores tarifas de pedágio. Referente à manutenção das rodovias administradas pela União, foram fixados gastos de R\$ 5 bilhões na pasta do Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil, de acordo com a Lei Orçamentária Anual de 2017 – LOA (CNA, 2017).

1.3 ASFALTOS ECOLÓGICOS

Uma das principais preocupações na produção de asfalto estão relacionadas ao consumo de energia, asfaltos consomem cerca de 22 tC/TJ (tonelada de carbono por TeraJoule). O aquecimento e a secagem dos agregados consomem altas quantidades energéticas, que representam cerca de 40 a 50% do total das emissões de CO₂ geradas durante a produção de uma tonelada de asfalto. Evitar o consumo de energia desnecessário, conseqüentemente, melhora a sustentabilidade do asfalto produzido.

Uma forma de mitigar tal estimativa energética negativa, emissão de gás carbônico, é a produção de asfaltos modificados, por exemplo, com borracha, na qual há uma redução significativa da espessura do revestimento projetado com ligantes tradicionais que chega a ser de 50%.

Visto a necessidade de compatibilizar o asfalto convencional para receber a modificação, por meio da adição de determinados aditivos e o custo industrial da modificação podem onerar o custo do asfalto borracha em relação ao preço do asfalto convencional em curto prazo, mas este custo a mais é plenamente justificável perante o seu benefício. Os asfaltos ecológicos possuem menor suscetibilidade a variações de temperaturas, resistência a deformação a altas temperaturas, melhores propriedades de resistência a longo prazo, maior vida útil à fadiga, melhor aderência entre agregados e matriz asfáltica, prevenção de afundamentos e rachaduras em asfaltos (GIBREIL; FENG, 2017).

O uso dos pneus na fabricação de asfalto constitui na adição do pneu triturado da reciclagem ao material de pavimentação. Dessa mistura, compõe-se o asfalto borracha, também denominado como asfalto ecológico, devido às contribuições ao meio

ambiente (FAKHRI; AMOOSOLTANI, 2017). O uso de pneumáticos como agregado na fabricação de pavimento possui grande importância ambiental: Substituição de agregados minerais, aumento da vida útil do pavimento devido ao acréscimo de borracha (FARINA *et al.*, 2017), maior retorno elástico, maior resistência ao envelhecimento precoce por oxidação do cimento asfáltico de petróleo e às intempéries e, ainda, maior resistência às deformações plásticas, evitando, assim, trilhas de rodas indesejáveis (AMIRP, 2009, p. 17).

Por ano são descartados no Brasil mais de 35 milhões de pneus velhos e que perdem completamente a sua utilidade enquanto pneus. O descarte é feito em lixões, depósitos, quintais (sob o risco de acúmulo de água parada que culmina no aparecimento do mosquito da dengue e outras doenças) entre outros locais improvisados. Assim, a borracha de pneus velhos é triturada e introduzida aos asfaltos, é capaz de diminuir as consequências causadas por acidentes de trânsito, ou seja, melhora a aderência pneu-asfalto e propicia revestimentos mais flexíveis, evitando derrapagem de veículos (DI GIULIO, 2010, p. 12).

Ao invés de simplesmente jogar esses pneus em locais como beiras de rios e matas é possível dar-lhes uma destinação diferente e mais útil. Uma idéia que parece ser a solução para essa questão do descarte e reciclagem de pneus é a transformação de asfaltos convencionais em asfalto-borracha (SIENKIEWICZ *et al.*, 2017).

Uma das técnicas mais promissoras para aumentar o desempenho da reabilitação de pavimentos é o uso de misturas de borracha asfáltica, que utilizam borracha granulada de pneus usados para modificar o asfalto e produzir ligante de borracha de asfalto. O desempenho do aglutinante de borracha em asfaltos depende das propriedades elastoméricas da borracha fragmentada, o processo de fabricação, especialmente o tempo de digestão, influencia essas propriedades (THIVES *et al.*, 2013).

Em Kedarisetty, Biligiri e Sousa (2016) as vantagens ecológicas com as rodovias de borracha são grandes, as financeiras também compensam ao longo do tempo, já que a construção de vias com esse pavimento é mais caro.

Há fatores que realmente são determinantes para uma maior durabilidade da rodovia após sua construção como a temperatura, o tráfego e, principalmente, a qualidade dos produtos asfálticos usados são fundamentais, que influenciam na durabilidade do pavimento (SHAH; MCMANN; BORTHWICK, 2017). A adição de agente modificadores dos asfaltos que aumentam o envolvimento dos agregados em

ligantes asfálticos, melhorando a sua resistência a passagem de rodas e durabilidade (PARK *et al.*, 2017).

O estudo realizado em Pais *et al.* (2015) comprovou a melhoria nas propriedades mecânicas, estabilidade e módulo de resiliência, de misturas de asfaltos com borracha produzidas com agregados minerais brasileiros. Isso indicou que o uso desses materiais aumentou a vida útil do projeto quando aplicado em camadas superficiais de pavimentos.

No artigo Fontes *et al.* (2010) as misturas de asfalto-borracha melhoram sua resistência à deformação permanente em relação à mistura asfáltica convencional brasileira mais utilizada, independente do tipo de borracha asfáltica ou graduação adotada. Observou-se que o ligante asfáltico de borracha com o maior ponto de amolecimento produz misturas asfálticas de borracha com melhor resistência à deformação permanente.

Estudos indicam que a má conservação das rodovias impacta de forma negativa a economia, ou seja, o volume poupado em serviços de manutenção da qualidade no momento adequado resulta em acréscimos em gastos futuros com obras de reconstrução e em custos adicionais para os usuários das vias. Estudos realizados Pesquisa Rodoviária da Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2006 e CNT, 2013), 75% dos trechos avaliados no Brasil foram classificados como deficientes em 2006 e 63,8% em 2013. Uma estrada degradada representa aumento de 58% no consumo de combustíveis, de 38% nos gastos de manutenção de veículo, de 50% no índice de acidentes e de até 100% no tempo gasto nas viagens. Segundo Bryce *et al.* (2017), pavimentos necessitam além de manutenção, de reciclagem para mitigar impactos ao meio ambiente. Desta forma, com a reciclagem, ou seja, o reaproveitamento das camadas de base do pavimento e camada de rolamento, em novos asfaltos, corroboram com o desempenho sustentável urbano local (KASEER; MARTIN; MERCADO, 2019).

Dentre outros materiais pós-consumo que podemos reutilizar na indústria da construção civil é o resíduo de madeira (SORMUNEN; KÄRKI, 2019). Segundo o Inventário nacional, o resíduo de madeira corresponde a 22% do resíduo oriundo da indústria de base florestal produzido no país. O setor moveleiro é o que mais desperdiça madeira na confecção de móveis e adornos, chegando ao extremo de 80% de uma árvore, desde o plantio até a pré-fabricação do móvel. O Brasil chegou a ser responsável pela fabricação de 4% de toras para serraria e laminação no mundo, apenas 21% da madeira nativa processada na Amazônia destinou-se à exportação (ADEODATO *et al.*,

2011). Deste material 50% foi transformado em produto, e os outros 50% restantes foram descartados ao meio ambiente, ou seja, um volume de 20 milhões m³ de resíduos gerados pela indústria madeireira.

1.4 JUSTIFICATIVA

A tese é a continuidade de dois trabalhos distintos: (1) dissertação intitulada “desenvolvimento de um ecopavimento contendo resíduo de madeira, polietileno pós-consumo e borracha de pneu”, o objetivo foi o desenvolvimento de revestimento asfáltico com resíduo de madeira, borracha de pneu e polietileno pós-consumo, publicada durante o mestrado no Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFPA (PPGEM-UFPA) de dezembro de 2011; (2) processo de preparação de composto asfalto com madeira da construção civil, patente de pedido de depósito BR102016006187-3 publicada no Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) durante o doutorado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia (PRODERNA) em 2016.

Neste trabalho foram apresentadas a preparação, caracterização e aplicação de asfalto tipo concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) modificado com madeira/borracha, o composto foi adicionado via seca em massa asfáltica a uma temperatura aproximada de 170°C (FIORE *et al.*, 2017), o asfaltamento se deu no trecho de um condomínio a ser urbanizado, uma faixa de pista para asfalto tipo CBUQ convencional para o pavimento local em uma área de 60 metros por 3 metros (180m³), outra faixa de pista para CBUQ misturado com madeira/borracha em uma área de 60 metros por 3 metros (180m³).

A principal diferença entre os materiais desenvolvidos durante o mestrado foi a adição de polímero tipo polietileno reciclado no asfalto madeira/borracha, enquanto que no doutorado foi desenvolvido o asfalto madeira/borracha para aplicação em via.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo geral

Fabricar material aplicável em revestimentos asfálticos para indústria da construção civil.

1.5.2 Objetivos específicos

- Fase de planejamento do projeto de estrada, definição e aplicação da estrutura do pavimento de asfalto convencional e modificado com a madeira/borracha em estudo;
- Estudo das características físicas dos materiais em estudo, análise reológica, granulométrica e micrografia de asfaltos modificados e comparar com asfalto convencional;
- Avaliar o material em estudo, madeira/borracha, misturado ao ligante, dentre tais aspectos: parâmetros de volume e parâmetros de resistência;
- Análise mecânica de asfalto convencional e modificado, através do módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral de revestimentos asfálticos convencionais e modificados com madeira/borracha;
- Fase de execução do projeto viário, aplicação de concreto betuminoso tipo CBUQ convencional e modificado.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é dividido em seis capítulos mais as referências. São eles:

- Capítulo 1: encontra-se a introdução, onde é apresentada a problemática ambiental e a importância do uso de resíduos da construção para diminuir os danos ocasionados ao meio ambiente, assim como problemática ao crescimento da frota de veículos a nível mundial, de outro lado, a qualidade dos pavimentos. São apresentados também as justificativas e os objetivos da pesquisa;
- Capítulo 2: constitui uma revisão da literatura existente a respeito dos temas deste trabalho. Trata-se de asfaltos, composição química, processos de produção, estocagem, manuseio e produção no Brasil. É abordada a mistura de asfalto com polímeros e elastômeros, assim como os agregados utilizados em pavimentação, quanto à natureza, forma dos grãos e suas características tecnológicas para aplicação em campo. As misturas, os tipos de revestimentos asfálticos mais usuais e ensaios mecânicos também são mencionados;

- Capítulo 3: constitui o programa experimental, no qual há uma abordagem do planejamento, projeto do experimento, índices físicos dos agregados em estudo e o projeto de mistura asfáltica para aplicação de mistura *in situ*;

- Capítulo 4: apresentam-se os métodos utilizados para execução de pista experimental em estudo construída de revestimento betuminoso convencional e revestimento betuminoso modificado com madeira/borracha;

- Capítulo 5: são apresentados os resultados obtidos e a análise dos resultados como a propriedade volumétrica, estabilidade, fluência, módulo de resiliência e resistência a tração;

- Capítulo 6: são apresentados os resultados de resistência mecânica de corpos-de-prova de asfalto extraídos em campo;

- Capítulo 7: são apresentadas as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo faz-se uma reflexão a respeito da temática abordada, dos aspectos ambientais e estruturais de asfaltos e asfaltos modificados com resíduos sólidos. Assim como ensaios mecânicos de laboratório que serão abordadas a suas análises em capítulos posteriores.

2.1 MADEIRAS DURAS EM ENGENHARIA

A Amazônia brasileira possui uma floresta densa com espécie diversas de madeira, nas quais 11.896 espécies são de angiospermas (BFG, 2015). Segundo site Reflora 202, no norte do país existe cerca de 12772 espécies de nomes aceitos de Angiospermas (Figura 2.1).

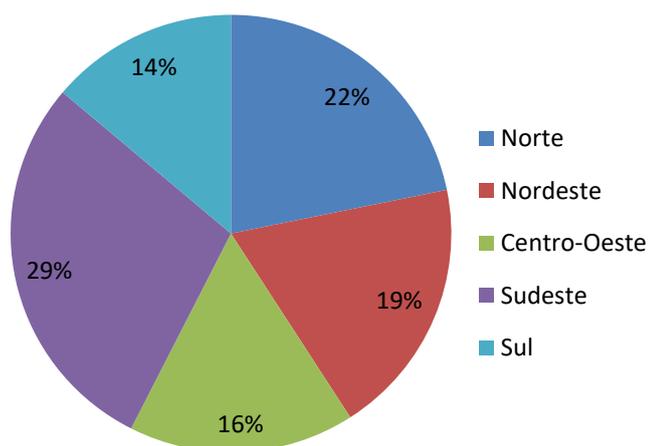


Figura 2.5 - Nomes aceitos de espécies por região brasileira.
Fonte: Angiosperma, [2019].

Segundo Mahayuddina *et al.* (2017), há dois tipos de estrutura usados na construção tradicional de casas tradicionais em Sarawak, Malásia. Estão usando a estrutura pesada de madeira dura local e a de madeira dura combinada com estrutura leve de bambu, dados estruturais estes benéficos para proteção patrimonial, cultural local e evita descartes ao meio ambiente.

Os desperdícios industriais da madeira são geralmente misturas de várias espécies de madeira coníferas, madeira dura, o outro material de lignocelulose da floresta. Em sua maioria as coníferas exibiram maior teor residual em comparação com

as espécies de madeira dura. Os produtos elaborados pela indústria de madeira serrada são produzidos com a utilização de madeiras provenientes de coníferas, comercialmente classificadas como *softwood*, de cor clara, macia, fibra longa e densidade uniforme. As espécies de madeira dura são altamente variáveis nos termos de sua estrutura anatômica e densidade que podem influenciar no processo de liquefação para fabricação de polímeros. As madeiras duras são encontradas em regiões de clima temperado e tropical. Não há quase nenhum estudo sobre o processo de liquefação de espécies de madeira tropical (KUMAR; SETHY; CHAUHAN, 2018).

A tensão produzida na madeira dura enfrenta maior resistência, devido à disposição das fibras, 50% constituinte da madeira dura, isso se deve a maior produção de celulose em madeiras duras em comparação as madeiras normais. Na construção civil, madeiras duras tem uma resistência maior paralela ao grão, onde madeiras duras reforçam concretos deixando mais resistentes (RAMAGE *et al.*, 2017).

Em Pereira *et al.* (2013), as curvas de calorimetria diferencial exploratória (DSC) indicaram um pico endotérmico entre as temperaturas de 50 e 100 °C, que pode ser atribuído à perda de água da madeira, pois se faz necessária a energia para a sua secagem. Constatou-se também que na faixa de temperatura compreendida entre 100 e 200 °C a perda de massa foi mínima (0,36%, em média).

Para Yang *et al.* (2007), a secagem da madeira, ocorre na faixa de temperatura entre 50-150°C; a decomposição das hemiceluloses, em torno de 220-315°C; a decomposição da celulose, entre 315-400°C; e a degradação da lignina, que ocorre em um amplo intervalo de temperatura (160 a 900°C).

2.2 LEGISLAÇÃO VERSUS REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS EM ASFALTOS

Segundo a resolução CONAMA Nº 307, de 5 de julho de 2002, em seu Art. 1º, estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos sólidos, são os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, disciplinando as ações necessárias de forma a minimizar os impactos ambientais.

Empresas do ramo da pavimentação asfáltica, não estabelecem a reciclagem e o reaproveitamento de materiais pós-consumo nos seus meios de produção e acabam impossibilitando disseminar novos materiais e tecnologias, além de degradar ainda mais o meio ambiente (BLAISI, 2019).

Os bota-foras clandestinos surgem principalmente da ação de empresas que se dedicam ao transporte dos resíduos das obras de maior porte e que descarregam os materiais de forma descontrolada (PINTO; GONZÁLES, 2005), em locais frequentemente inadequados para esse tipo de uso e sem licenciamento ambiental. Em grande número de casos, contudo, há consentimento — tácito ou explícito — das administrações locais.

Assim, identificar, cadastrar e exigir que as empresas de obras de terra busquem legalização ambiental para o transporte de resíduos da construção civil (PIOVEZAN JÚNIOR; SILVA, 2007).

A adoção de sistemas de logística reversa, ou seja, o conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada, poderá proporcionar benefícios como redução de custos (diretos e indiretos) para as empresas (WANG *et al.*, 2019b); redução da demanda por matérias-primas e energia; redução da geração de resíduos; melhoria da imagem da empresa e geração de oportunidades de incremento de renda, de forma organizada e articulada, para grupos sociais específicos, associações e cooperativas de catadores, principalmente (VITORINO *et al.*, 2010). Para Chinda (2017), a implementação da logística reversa ajuda a reduzir os efeitos ambientais e a aumentar a eficiência das atividades na indústria da construção, os resultados do estudo revelam fatores-chave, incluindo "conformidade com as leis e regulamentos", a "disponibilidade de gerentes com a experiência de logística reversa necessária", as "penalidades", a "preocupação dos trabalhadores com o meio ambiente" e a "abertura de espaço" para o uso de materiais reciclados". O apoio à gestão e à atitude positiva para a implementação logística reversa são necessários para a implementação de logística reversa bem-sucedida no setor de construção.

2.3 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL E AS PERSPECTIVAS FUTURAS NO SETOR DA CONSTRUÇÃO

A indústria da construção civil, em função das características particulares do seu processo produtivo, quando comparada com outros segmentos industriais, e considerando-se sua dimensão em termos de consumo de recursos, constitui-se em uma grande geradora de resíduos.

Como desafio atual, envolvendo os pesquisadores desta instituição, está sendo iniciado um grande programa de intervenção em canteiros de obras que, entre outros objetivos, pretende aprimorar e operacionalizar a postura de gestão contínua do consumo de materiais nos canteiros, permitindo que ela seja utilizada permanentemente pelas empresas construtoras. Espera-se que a ampla aplicação do programa que venha a reduzir em alguns pontos percentuais a perda e a geração de resíduos na construção (SOUZA *et al.*, 2004).

As soluções dos problemas ambientais da construção civil devem fazer parte da rotina das empresas, e do gerenciamento das obras pelos engenheiros. Isso deve ocorrer, não só com o intuito de proporcionar uma melhor qualidade de vida atual, mas também, proporcionar às futuras gerações, a equidade no acesso do meio ambiente socialmente justo (PIOVEZAN JÚNIOR, 2007).

Acredita-se que a mobilização da comunidade é fundamental para a efetivação de um sistema de logística reversa. Esta participação pode ser obtida mais facilmente por meio de um maior grau de conscientização e informação a respeito das leis que tratam de questões ambientais, assim como informações mais específicas sobre a importância e os benefícios da responsabilidade pós-consumo e da logística reversa, contempladas na legislação, com vistas ao desenvolvimento socioambiental da população como um todo (VITORINO, *et al.* 2010).

Deve-se aplicar a promoção de tecnologias ambientais amigáveis, mesmo quando estes são mais caros, e as leis devem ser rigorosamente desempenhadas e seu acompanhamento obrigatório das condições ambientais deve ser estabelecido (BOSDOGIANNI, 2007).

2.4 MISTURAS ASFÁLTICAS USUAIS EM PAVIMENTAÇÃO

O uso do asfalto na construção de estradas tem aumentado gradualmente ao longo dos anos e atingiu seu pico em 1979. Especula-se que o consumo atual mundial de asfalto tem mais de 100 milhões de toneladas. Atualmente nos Estados Unidos, o consumo anual é de pelo menos 25 milhões de toneladas. Aproximadamente 94% das estradas dos EUA são pavimentadas com asfalto.

Nas últimas décadas, poucos assuntos têm apresentado tanta repercussão no mundo como a questão ambiental. Isso se deve ao alto grau de degradação ambiental decorrente, principalmente, dos processos produtivos, que vêm comprometendo, seriamente, a qualidade de vida do planeta (GÜNTHER; GEIBLER; KÖPPEL, 2017).

O asfalto é uma substância plástica que confere flexibilidade controlável às misturas com agregado mineral (ROSSI *et al.*, 2017). É de grande importância porque é um material prontamente aderente, altamente impermeabilizante e durável (KONG *et al.*, 2017). Possui elevada resistência à ação da maioria dos ácidos, álcalis e sais. A obtenção do asfalto tanto pode ser pela evaporação natural de depósitos localizados na superfície terrestre (asfaltos naturais), como por destilação em unidades industriais, especialmente projetadas. O emprego do asfalto derivado de petróleo surgiu a partir de 1909 e, devido as suas características de economia e pureza em relação aos asfaltos naturais, constitui atualmente a principal fonte de suprimento para a pavimentação (GANTER *et al.*, 2019).

As usinas de asfalto também são fontes poluidoras, contaminam o solo, contaminam a água superficial e subterrânea, poluem o ar, adensam e fazem a compactação do solo, estes agentes identificados durante a fase de operação (RAUBER; CASSANEGO; SILVA, 2004).

O asfalto é utilizado na construção de pavimentação de rodovias, pois é um cimento forte, facilmente adesivo, altamente impermeável e durável. É uma substância plástica que confere flexibilidade controlável a misturas de agregados minerais com que é normalmente combinada, sendo seu controle feito pela reologia e durabilidade quanto à ação de agentes climatológicos (WANG; CHONG; WEN, 2017). É por causa dessas qualidades superiores que o asfalto é amplamente utilizado na construção de estradas (COELHO *et al.*, 2011a).

As misturas asfálticas contêm aglutinante de asfalto e agregados graúdos e miúdos. O asfalto de mistura a quente é uma combinação de pedra, areia ou cascalho

unido por cimento asfáltico, um produto de petróleo bruto. O cimento asfáltico é agregado aquecido, combinado e misturado com o agregado em uma usina de asfalto. Existem também agregados provenientes de materiais reciclados da própria pavimentação, que geram custos menores e dependendo da mistura com compósitos poliméricos ou elastoméricos, ganham maior durabilidade depois de aplicados em pista (ARSHAD; AHMED, 2017).

Algumas regiões costeiras brasileiras apresentam deficiência de materiais tidos como nobres em pavimentação e obras de terra em geral, como agregados pétreos e solos residuais, cujo emprego envolve grandes distâncias de transporte. Neste sentido, segundo Bastos *et al.* (2008), muitos centros de pesquisa e universidades têm concentrado esforços no estudo de materiais considerados alternativos, visando, em última análise, viabilizar economicamente obras públicas.

A metodologia de dimensionamento de pavimentos asfálticos tradicionais, tem-se limitado inicialmente a cerca de 20 anos. O ciclo de vida do pavimento consiste em cinco fases: extração de materiais e produção, construção, manutenção, utilização e fim de vida (SANTERO; HARVEY; HORVATH, 2011; SHIH; MA, 2011). O fim de vida do asfalto se dar a partir do seu envelhecimento, ou seja, baixa reatividade química que não evita que esse material possa sofrer, no entanto, um processo de envelhecimento por oxidação lenta pelo contato com o ar e a água. Os asfaltos convencionais restaurados, seja com material modificador ou não, acabam durando menos com o passar dos anos, porque há projetos ruins, execução errada e material de baixa qualidade comprado como se fosse de primeira. E, o que é pior, as fraudes se multiplicam por falta de fiscalização.

Em Rodrigues, Soares e Soares *et al.* (2010), quando o ligante asfáltico modificado apresentar valores elevados de viscosidade, a incorporação de aditivos pode ser um recurso útil para reduzir a viscosidade e assim minimizar os gastos de energia com o processamento do asfalto. Em Mo *et al.* (2010), a reologia de asfaltos em modo dinâmico, submetendo o ligante a tensões de cisalhamento oscilatórias, que pode representar a deformação do pavimento “in situ”, proporcionado pelas forças de contato direto do pneu com a estrada.

Segundo Li *et al.* (2017), em asfaltos modificados com elastômeros tipo borracha de pneu moída ocorrem mudanças físicas e reações químicas em seu processamento. É especulado que as correspondentes reações que ocorrem no processo de modificação de asfalto-borracha incluem a absorção de componentes leves e decomposição de cadeias quebradas de borracha.

Em Thodesen, Shatanawi e Amirhanian (2008), a viscosidade do asfalto é de grande importância para o processo de produção de misturas de massa asfáltica a quente na qual são armazenadas geralmente entre 149 °C à 177 °C. Os asfaltos-borracha podem ser armazenados de 150 °C a 200 °C.

2.5 OS REJEITOS DE CONSTRUÇÃO NO BRASIL

Os materiais sustentáveis devolvem a economia, o meio ambiente e a energia porque a fonte renovável tem muitos impactos positivos em empregos e alimenta as atividades econômicas no mundo (HU *et al.*, 2017), isso significa que o sistema econômico atua como intermediário do sistema ecológico. Os materiais de construção podem ser produzidos a partir de fontes sustentáveis recicladas, reutilizadas ou inofensivamente dispostas em uso final (SAGBANSUA; BALO, 2017).

A geração de resíduos da construção civil (RCC) no Brasil é estimada entre 230-760 kg/hab. ano e as estimativas internacionais mostram uma variação de 130-3000 kg/hab. ano. Muitas cidades brasileiras ainda não possuem um sistema de gerenciamento dos RCC (PIOVEZAN JÚNIOR, 2007) como preconizado pela Resolução 307 do Conselho Nacional de Meio Ambiente.

O desperdício de material pode-se dar, basicamente, de três maneiras distintas (SOUZA, *et al.* 2004), são elas:

- Furto e/ou extravio – o que normalmente é um valor muito baixo em grandes empreendimentos os quais, normalmente, tem controle qualitativo e quantitativo dos materiais;

- Incorporação de materiais à edificação – fato esse que ocorre principalmente em materiais para moldagem de peças in loco nas obras tais como: peças de concreto armado e revestimentos argamassados;

- Resíduos da Construção Civil (entulho) – que é o “lixo que sai da obra”, o qual é considerado o modo mais visível de verificar o desperdício de uma obra.

De maneira geral, a quantidade de materiais perdidos em obras que refletem na geração de resíduos corresponde em massa, em valores iguais e maiores que a massa de resíduos sólidos domiciliares, o diferencial é que em sua maioria os resíduos sólidos urbanos contem cerca de 51,4% composta por matéria orgânica (DEUS; BATTISTELLE; SILVA, 2017). Esta predominância dos RCC sobre todos os resíduos gerados no ambiente urbano (PINTO, 2005) no estudo realizado em dez municípios da

região sudeste, São Paulo, Guarulhos, Diadema, Campinas, Piracicaba, São José dos Campos, Ribeirão Preto, Jundiaí, São José do Rio Preto e Santo André (Figura 2.2).

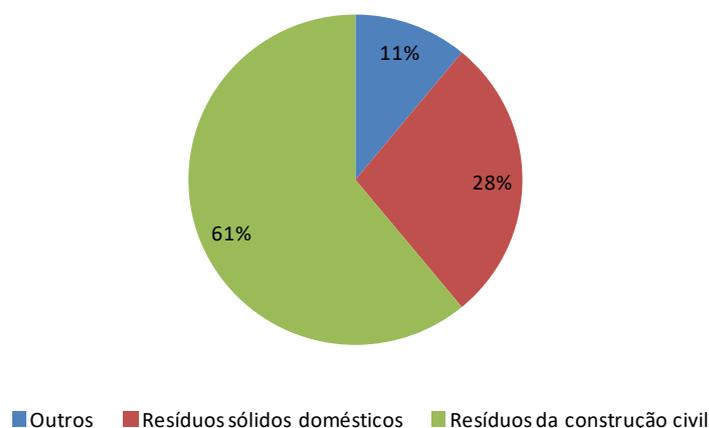


Figura 2.6 - Percentagem em massa de vários constituintes dos resíduos sólidos urbanos em dez cidade da região sudeste.

Fonte: Adaptado de Pinto (2005).

O desenvolvimento econômico, urbanização e intensa mudança nos padrões de consumo têm resultado em um aumento da geração de resíduos sólidos (BOSDOGIANNI, 2007). Com relação à composição apresentada na Figura 2.3, verifica-se um elevado percentual de componentes recuperáveis coletados por meio da coleta seletiva, como plásticos, metais, dispositivos eletrônicos, borracha e outros que deveriam retornar ao ciclo produtivo propiciando a diminuição de impactos ambientais e gerando impactos positivos econômicos e sociais (REBEHY *et al.*, 2017).

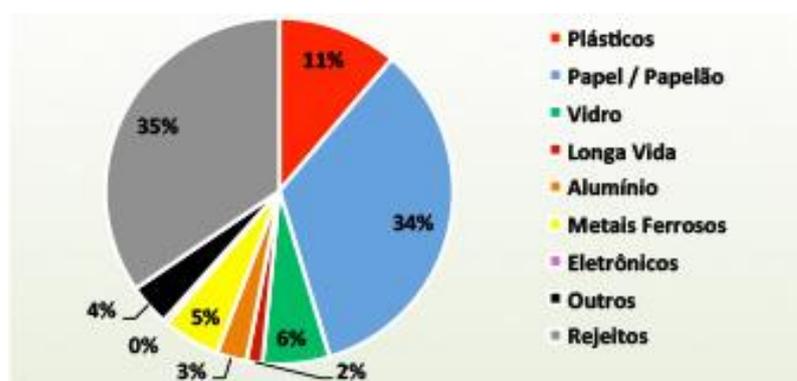


Figura 2.7 - Composição da coleta seletiva no Brasil.

Fonte: Ciclossoft (2016).

Os resíduos da construção civil no Brasil têm diferentes origens, mas, destaca-se conforme a Figura 2.4, a grande quantidade de resíduos que são gerados em reformas, ampliações e demolições (SALAZAR; RIVERA; DE GUTIÉRREZ, 2017).

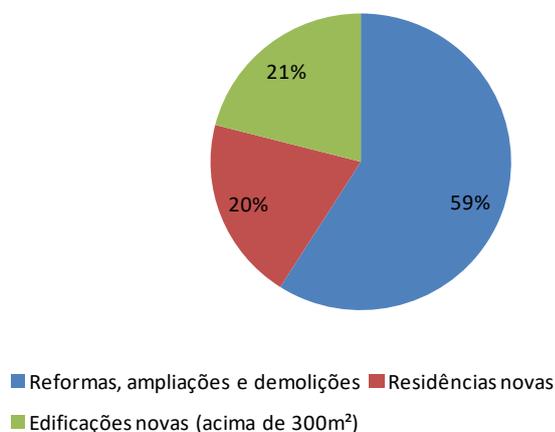


Figura 2.8 - Quantificação em massa da origem dos RCC no Brasil.
Fonte: Sinduscon (2012).

Em alguns municípios brasileiros mais de 75% dos resíduos da construção civil são provenientes de construções informais (obras não licenciadas) enquanto 15% a 30% são oriundas de obras formais, licenciadas pelo poder público (PINTO, 2005; PGRCC, 2014).

Diante desse cenário e da importância crescente que a busca por um desenvolvimento sustentável vem recebendo, observa-se atualmente uma ênfase na discussão de caminhos para se reduzir o consumo desnecessário de materiais na construção civil (LAM *et al.*, 2019). No que diz respeito à questão dos resíduos, pode-se atuar em vários momentos do empreendimento. Pode-se atuar na reciclagem ou reuso dos resíduos, mas, existe também um grande potencial de reduzir a sua geração nos canteiros de obras, amenizando o seu impacto ambiental (SOUZA *et al.*, 2004; MAK *et al.*, 2019).

2.6 BORRACHAS INSERIDAS EM ASFALTOS

Para mistura de asfalto com materiais reciclados, na literatura, tem-se realizados ensaios de fluência Marshall, ensaios de fadiga. Vale destacar ultimamente os macro e microtestes de deslizamento de camadas asfálticas para verificar a durabilidade de asfaltos modificados (PRATICÒ; ASTOLF, 2017; WANG; CHONG; WEN, 2017) e cisalhamento das interfaces para a determinação da rigidez de asfaltos modificados

(JUNG *et al.*, 2017). Os parâmetros obtidos são utilizados no projeto do pavimento e sob o aspecto econômico em projetos alternativos que são avaliados considerando o custo do material (ARAVIND; DAS, 2007).

Outro fator importante a mencionar são os resíduos plásticos e de borracha sintética, tanto de construção quanto de uso doméstico, pois, junto com o desenvolvimento da sociedade e da civilização material, a embalagem tem se tornado cada vez mais importante na vida diária e até mesmo se tornar um elemento indispensável importante da mercadoria, enquanto ao mesmo tempo, o súbito aumento dos resíduos de construção e embalagens em massa e o gasto em produtos, têm trazido uma enorme pressão ao meio ambiente (PINTO; GONZÁLES, 2005). Combinada modificação de asfalto por pedaços de polietileno de garrafas pós-consumo e pó de borracha, o ponto de amolecimento e as performances de alta temperatura e baixa temperatura do asfalto foram melhorados com intensidades diferentes. A dosagem de pedaços de polietileno é mais influente sobre o desempenho em altas temperaturas, enquanto os resíduos de pó de borracha podem melhorar a resistência à fissura em baixa temperatura (FANG, *et al.* 2008).

O asfalto-borracha, constituído de 20% de borracha moída de pneus velhos, começa a ser aplicado em larga escala em algumas estradas brasileiras. Hoje, as maiores partes dos pneus velhos ainda vão parar nas fábricas de cimento, servindo como fonte auxiliar de energia, pois o pneu tem alto índice de combustão, índice este que indica a geração de energia através da queima. As indústrias de cimentos também cobram para receber os pneus.

Desta forma para amenizar os prejuízos ocasionados ao meio ambiente, empresas estão adotando a reciclagem de asfaltos, asfalto ecológico, termo este muito utilizado para designar asfalto-borracha.

O asfalto-borracha é um destino para os pneus velhos, parte importante dos resíduos sólidos que poluem o ambiente. Estima-se que cada quilômetro pavimentado com asfalto-borracha consuma, em média, 500 pneus. Além dos benefícios ecológicos, proporciona mais segurança e conforto aos usuários (WALLQVIST *et al.*, 2017) que, ao passar pela rodovia, percebem que a nova textura do pavimento em contato com o veículo gera menos ruído, maior aderência dos pneus e menor dispersão de água em caso de chuva, além de ser mais durável.

Em uma publicação da Universidade de São Paulo (USP), tem como objetivo estudar os mecanismos de enchentes onde o asfalto é a peça-chave para solucionar os

problemas ao meio ambiente (COELHO; DE SOUSA; DIAS, 2011b). A idéia era poder absorver a água da chuva no revestimento da pavimentação que se usa nas ruas, nos loteamentos, condomínios e estacionamentos.

Nesta pesquisa desenvolvida na USP, foi confeccionada uma camada porosa de asfalto – CPA para serem aplicadas próximo a áreas de várzea dos rios que tendem a ser assoreados, onde os volumes das chuvas são maiores, provocando enchentes.

A idéia é que o pavimento absorva a água e a armazene. De acordo com os estudos realizados, a CPA disponibiliza 25% de espaço para a água infiltrar.

2.7 MISTURAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS COM RESÍDUOS SÓLIDOS

Materiais reciclados podem ser inseridos ao ligante asfáltico, a exemplo de polímero tipo polietileno (PE) virgem ou proveniente de resíduo pós-consumo. Os resultados de ductilidade e ponto de amolecimento tendem a aumentar quando o asfalto é modificado por PE.

As fibras de polipropileno (PP) são usadas para modificar o ligante betuminoso, a fim de melhorar as propriedades físicas e mecânicas de misturas asfálticas (FANG *et al.*, 2008). A inserção de fibras de PP ocasiona aumento nos valores de estabilidade e de quociente de Marshall, considerado uma espécie de pseudo-rigidez (TAPKIN; ÇEVIK; UŞAR, 2010). As fibras metálicas reduzem o custo na construção de pavimento, reduzindo a manutenção dos mesmos, melhoram o desempenho mecânico na flexão e o comportamento térmico de asfaltos (YANG; SHIN; YOO, 2017).

Em 02 de agosto de 2010, foi sancionada a Lei Nº 12305, institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, dispondo sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluídos os perigosos, um importante avanço para o Brasil em termos ambientais. A lei cria um marco regulatório para o lixo, seja ele aproveitável ou não. No caso dos pneus inservíveis, é importante levar em consideração que uma legislação própria já regulamentava seu descarte e destinação desde 1998. A Legislação Brasileira aponta a auto-responsabilidade das empresas na remoção, estocagem e tratamento de resíduos gerados pelos processos de produção (SILVA; DE FIGUEIREDO, 2010; FAGUNDES, 2003), a partir de procedimentos adequados para a conservação do meio

ambiente. Segundo Markiewicz (*et al.*, 2017), em sua pesquisa, foram encontradas mais de 1.100 poluentes orgânicos emitidos durante a construção de estradas.

Os pneus descartados na natureza constituem, nos países mais desenvolvidos e em muitos em via de desenvolvimento um enorme passivo ambiental. Só no Brasil são produzidos cerca de 40 milhões de pneus por ano e quase metade dessa produção é descartada nesse período, onde em sua maioria, a outra metade é usada na fabricação de pneus, recauchutagem (OLIVEIRA *et al.*, 2010). Devido ao aumento do número de automóveis e a falta de um programa de recuperação sistemática, o uso de borrachas de pneus inservíveis modificadores do betume pode ajudar a aliviar a poluição causada pelo descarte de pneus inservíveis. Asfaltos modificados com resíduos provenientes da borracha de pneu são cada vez mais aplicados em estruturas de pavimentos em todo o mundo.

Projeto de lei municipal nº 1500 de 2007, propõe que todos os programas de asfaltamento e recapeamento de rodovias do Município de São Paulo usem “asfalto-borracha” ou asfalto ecológico.

Projeto de Lei municipal nº 215 de 2009, institui o recolhimento e destinação de pneus inservíveis da frota municipal de veículos de Manaus para a produção de asfalto-borracha. Segundo este projeto, são propósitos da adição de borracha oriunda de pneus usados em misturas betuminosas para a pavimentação urbana: minimizar o problema da disposição de pneus usados, ampliando a vida útil do aterro sanitário de Manaus; eliminar o lançamento de materiais ambientalmente nocivos, causadores de poluição cênica, residual e que propiciam a proliferação de vetores de doenças. Borracha de pneu adicionada ao ligante melhora o desempenho dos pavimentos urbanos reduzindo os custos com obras de reparos e revestimento das vias urbanas. Borracha moída é conhecida por melhorar aspectos de desempenho de mistura asfáltica, como a suscetibilidade térmica, o comportamento elástico, resistência à fadiga e ao envelhecimento (AFLAKI; TABATABAEE, 2009). Para isso, segundo Thodesen, Xiao e Amirkhanian (2009), depende de outros fatores como: local de produção, processo de moagem, a seleção do tipo de material e o tipo de pneu.

Além de modificadores a base de polímeros adicionados ao betume também podem ser acrescentados ao cimento asfáltico enchimentos inertes. A inclusão de material que passa pela peneira de malha nº 200 (0,075 mm), "filler", não altera as propriedades do concreto. Para Al-hadidy e Tan (2009), um material de enchimento é introduzido na mistura de asfalto a quente para proporcionar maior estabilidade e resistência.

Outro fator importante baseado numa análise científica quanto a inserção de resíduos de borracha em asfaltos, está associada à melhoria ergonômica e de ruídos, associado a barulho de buzinas, poluição do meio, e pode modificar a nossa visão das causas dos acidentes bem como das medidas a adotar para evitá-los. As medidas infra-estruturais também podem ser aplicadas, medidas como, a eliminação dos delineadores laterais, aumento da largura da linha central, e colocação de uma superfície rugosa sobre a linha central (NORIEGA; SANTOS; MIGUEL, 2002).

2.8 ASFALTOS MODIFICADOS COM BORRACHA

As propriedades reológicas de asfalto, a viscoelasticidade, pode ser medida a partir do desempenho de misturas asfálticas durante o processo de usinagem, compactação e vida em serviço.

A modificação de ligantes asfálticos com borracha moída proporciona um produto com maior rigidez e maior elasticidade. Tais propriedades reológicas se refletem no aumento da parcela de resistência à deformação permanente das misturas asfálticas atribuída ao ligante asfáltico (FAXINA *et al.*, 2007). Asfaltos modificados com borracha são obtidos com vida útil superior em faixas de temperaturas associadas à deformação permanente, mas a princípio podem possuir trabalhabilidade prejudicada. A melhoria do desempenho do ligante asfáltico está diretamente relacionada à concentração de borracha moída, porém excessos de borracha são prejudiciais, aumenta a viscosidade nas temperaturas de mistura e compactação, atingindo níveis impraticáveis.

Em Cárdenas & Fonseca (2009), as propriedades reológicas de asfalto dependem das proporções em que os componentes estão presentes, que variam de acordo com a origem do produto modificador. O comportamento reológico do ligante tem uma influência significativa sobre as propriedades da mistura de asfalto-agregado (formação de sulcos, fadiga e sensibilidade térmica).

A adição de polímeros é uma alternativa versátil para modificar a reologia dos asfaltos. Muitos tipos de polímeros são aproveitáveis, entretanto, não há um polímero universal e uma seleção deveria ser feita de acordo com as necessidades. As propriedades reológicas de asfaltos são determinadas pelas interações moleculares na qual dependem da sua composição química (SENGOZ; ISIKYAKAR, 2007).

CAPITULO 3 – PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo será abordada a fase de planejamento e execução do projeto de estrada, aplicação em campo, de asfalto convencional, modificado com borracha reciclada de pneu e resíduo de madeira dura usual na indústria da construção civil, assim como a análise física, morfológica, volumétrica e mecânica do composto em estudo.

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A implantação da estrutura de pavimento em estudo, com a adição de concreto asfáltico incorporado com borracha reciclada de pneu e madeira foi feita para avaliação dos aspectos estruturais do pavimento, mas com foco principal a mistura asfáltica modificada, submetida a cargas de tráfego “in loco”. Foram executadas duas faixas do conjunto condominial em estudo, uma com asfalto convencional e outra com asfalto modificado com a incorporação de borracha de pneu reciclada e madeira. O processo utilizado neste trabalho foi a aplicação via seca e foram avaliados os processos construtivos, propriedades funcionais das camadas de pavimento, ensaios de laboratório que colaboram para os bons resultados em função da execução dos dois trechos experimentais.

3.2 PLANEJAMENTO DO PROJETO

O experimento foi realizado em perímetro urbano, não pavimentado como pode ser visto na Figura 3.1, através da pavimentação de um trecho em um conjunto condominial localizado na Rodovia Juscelino Kubitscheck, Km 05, Jardim Equatorial, Macapá-AP, Brasil. A Figura 3.1 tem-se a área 1 possui área de 220 x 3 metros, 660 m² enquanto a área 2 possui 30 x 8 metros, 240 m², na Figura 3.1 a área não hachurada foi onde aconteceu a aplicação do asfalto convencional e na área hachurada ocorreu a aplicação do asfalto com madeira/borracha.



Figura 3.1 - Vista panorâmica do conjunto condominial em estudo.
Fonte: Google Maps.

Para a análise do trecho experimental foram elaboradas as seguintes etapas a serem seguidas:

- a) Projeto geométrico;
- b) Caracterização do subleito;
- c) Dimensionamento de pavimento;
- d) Caracterização e avaliação dos materiais;
- e) Elaboração do projeto de mistura asfáltica convencional; e mistura asfáltica com incorporação de borracha reciclada de pneus e madeira;
- f) Implantação de rede de drenagem de água e esgoto;

- g) Execução da terraplenagem, regularização do subleito, execução da base de brita graduada, colocação dos meios-fios, imprimação e ensaios de controle tecnológico;
- h) Calibração da usina gravimétrica móvel tipo Ciber KOMPAKT 500, capacidade de produção de 40 T/h;
- i) Execução dos revestimentos com concreto asfáltico convencional com incorporação de borracha reciclada de pneus e resíduo de madeira dura;
- j) Análise dos resultados.

3.3 PROJETO DO EXPERIMENTO

3.3.1 Projetos: geométrico, drenagem superficial, rede de água, rede de esgoto

Foram usados os projetos elaborados pela empresa ETECON LTDA. utilizado para a pavimentação da via em estudo. Contemplando assim o trecho em experimento com asfalto misturado com borracha moída de pneu reciclada e madeira.

3.3.3.1 Definição da estrutura do pavimento

A pavimentação asfáltica foi feita de acordo com as normas do Departamento Nacional de Estradas e Rodagens (DNER), método este desenvolvido pela empresa terceirizada a ETECON LTDA. para vias com revestimento de pavimentos flexível. A metodologia proposta pelo Eng. Murillo Lopes de Souza, ensaio de ISC (índice de suporte Califórnia) ou CBR em inglês (Califórnia Bearing Ratio) metodologia esta usada para obtenção dos resultados de índice de grupo, do tráfego e dos coeficientes de equivalência estrutural.

O método de dimensionamento de pavimentos flexíveis do DNER que se adota no país é a adaptação do método de dimensionamento de pavimentos de aeroportos do Corpo de Engenheiros dos Estados Unidos, conforme proposto em 1962 por Turnbull, Foster & Ahlvin (MEDINA, 1997).

Neste método de dimensionamento, para efeito de projeto, o tráfego que transitará sobre determinado pavimento ao longo de sua vida útil de serviço é convertido em um número de operações/solicitações de um eixo rodoviário padrão. Este número de solicitações é conhecido como número “N” (Equação 1).

O eixo padrão rodoviário brasileiro é um eixo simples de rodas duplas e que transmite ao pavimento uma carga total de 8,2 toneladas (80 kN). Neste eixo a superfície de contato dos pneus com o pavimento é representada por uma área circular de 10,8 cm de raio e tensão de contato de 0,55 MPa.

$$N = 365.P.Vm.FE.FC.FR \quad (1)$$

Sendo:

N - parâmetro representativo do efeito destrutivo do tráfego, correspondente ao número equivalente de repetições do eixo de 80,42 kN;

P - período de projeto, em anos;

Vm - volume médio diário de tráfego, durante o período de projeto na faixa de projeto;

FE - fator de eixos, que é a média ponderada das quantidades percentuais dos diversos tipos de eixos que atuam no pavimento;

FC - fator de equivalência de carga dos eixos da frota para o eixo padrão 80,42 kN;

FR - fator climático regional.

O FR é um item fundamental para a obtenção de pavimentos asfálticos concisos com as condições climáticas locais. Este fato deve-se a constatação de que a umidade presente no subleito e no interior de uma estrutura de pavimento é variável em função do regime de chuvas de determinada região. Consequentemente, são diferentes as respostas estruturais de pavimentos com a mesma estrutura e submetidos aos mesmo carregamento, mas sob condições de umidade diferentes, refletindo isto no aumento ou diminuição da sua vida útil de serviço.

Para tentar minimizar este efeito no dimensionamento de pavimentos, o método do DNER propôs a adoção de um Fator Climático Regional, em função da precipitação pluviométrica anual, e que deve ser adotado no cálculo do número “N”. A Tabela 3.1 mostra os valores a serem adotados para o fator climático regional de acordo com a altura média anual de chuva.

Tabela 3.1 - Fator regional climático segundo o DNER, manual de pavimentação.

Altura média anual de Chuva (mm)	Fator Climático Regional (FR)
Até 800 mm	0,7
De 800 a 1500	1,4
Mais de 1500	1,8

Fonte: Manual de pavimentação, DNER.

Em Macapá-AP, o clima está diretamente ligado a períodos do ano, segundo dados do Instituto nacional de meteorologia - INMET, a Figura 3.2 mostra a previsão quantizada de chuva mensal no período de 2019.

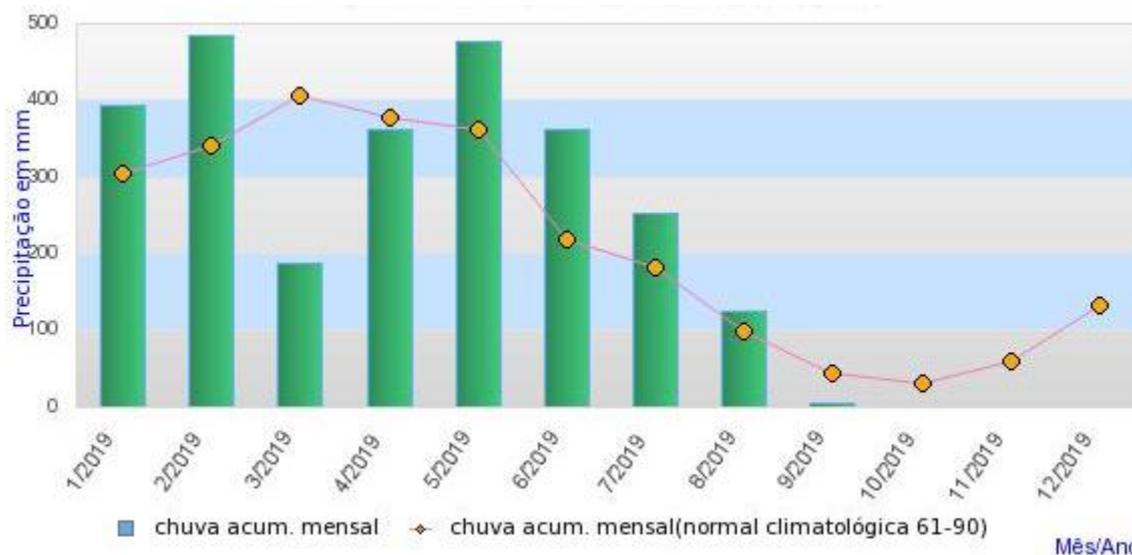


Figura 3.2 - Chuva acumulada x chuva (normal climatológica 61-90) em Macapá-AP no ano de 2019. Fonte: INMET (2019).

Assim, o fator regional no Brasil gira em torno de 0,7, segundo consta a Tabela 3.1, baseado em dados do DNER.

A temperatura em Macapá-AP está descrito na Figura 3.3, onde tem-se a temperatura mínima, máxima e média compensada nos meses de 2019, com previsão para os meses de outubro, novembro e dezembro de 2019.

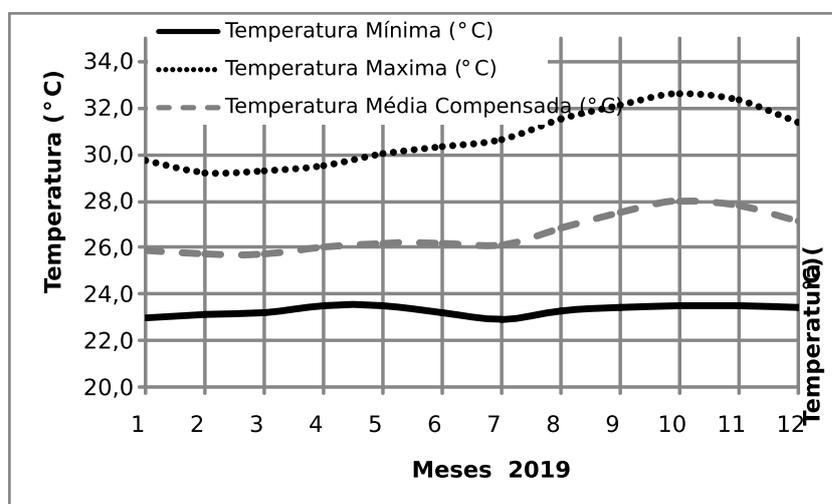


Figura 3.3 - Temperatura em Macapá-AP no ano de 2019. Fonte: INMET (2019).

A contagem classificatória do tráfego consiste em quantificar e classificar por tipo de veículos o volume que trafega por um determinado trecho da rodovia, durante um determinado intervalo de tempo, pode-se observar os dados obtidos em campo na Tabela 3.2, dados estes obtidos através da empresa ETECON LTDA.

Para realização das contagens, é necessária a implantação de um conjunto de instalações e aparelhos que exerçam distintas funções de captação, transmissão, detecção, processamento e registro de volumes de fluxo de tráfego. Porém, para este projeto foi usado o método manual, onde os dados foram coletados por grupos de pesquisa.

Tabela 3.2 - Tráfego “in loco”.

Veículo	Frequência		
	Mensal	Semanal	Diária
Caminhão de lixo	4	6	
Ônibus	12	29	23
Veículo leve	22	256	650
Veículo médio	9	189	34
Veículo pesado	2	62	29
‘Média passagens Diária(V)	736		

De acordo com o projeto local, foram adotados um período de projeto P de 10 anos, e uma taxa de crescimento anual linear t de 5% ao ano, fator de eixos de veículos FE= 2 (propor na falta de dados segundo o DNER), fator climático regional FR= 1 (ausência de informações segundo o DNER) e média de passagens por dia V= 736, FC = 1 (SOUZA, 1981) o fator climático igual a 1 devido à falta de elementos para experimentação) cabe definir o número acumulado de passagem de carga padrão pela Equação 1. A Equação 2 fornece o volume médio diário.

$$V_m = \frac{V_1 \cdot [2 + (P - 1) \cdot T]}{100} / 2 \quad (2)$$

Sendo:

V_m - volume médio diário de tráfego

V₁ - volume médio diário de tráfego no ano de abertura

P - período de projeto, em anos;

T - taxa de crescimento anual do tráfego.

Resolvendo as equações 1 e 2, obtém-se:

$$V_m = 906,6 \text{ veículos/dia}$$

$$N = 2,11 \cdot 10^6$$

Onde N é o Número de repetições de carga equivalente a um Eixo Padrão de 8,2t (eixo padrão rodoviário). Segundo a publicação do DNER, método de projeto de pavimentos flexíveis, o resultado encontrado se encaixa no intervalo de $10^6 \leq N \leq 5 \cdot 10^6$, ou seja, construção de revestimento betuminoso de 5,0 cm.

Para caracterização do material do subleito, foi feita sondagem a trado (Anexo I) e coletados materiais das camadas subjacentes ao pavimento, e analisadas em laboratório definindo a capacidade de suporte do subleito (Anexo II).

Para a determinação da camada de suporte do subleito foram utilizados os resultados de 2 furos de sondagem, adotando-se os valores quanto ao horizonte do subleito. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 3.4 e Tabela 3.3. No Tabela 3.4 apresentam-se os resultados do ensaio de índices físicos do solo (Anexo III).

A distribuição dos valores de CBR ao longo do trecho em estudo há uma certa coerência quanto aos resultados. Utilizando-se o conjunto de valores na determinação do Índice de Suporte Califórnia (ISC), adotou-se Índice de suporte de projeto (ISP) = 14%.

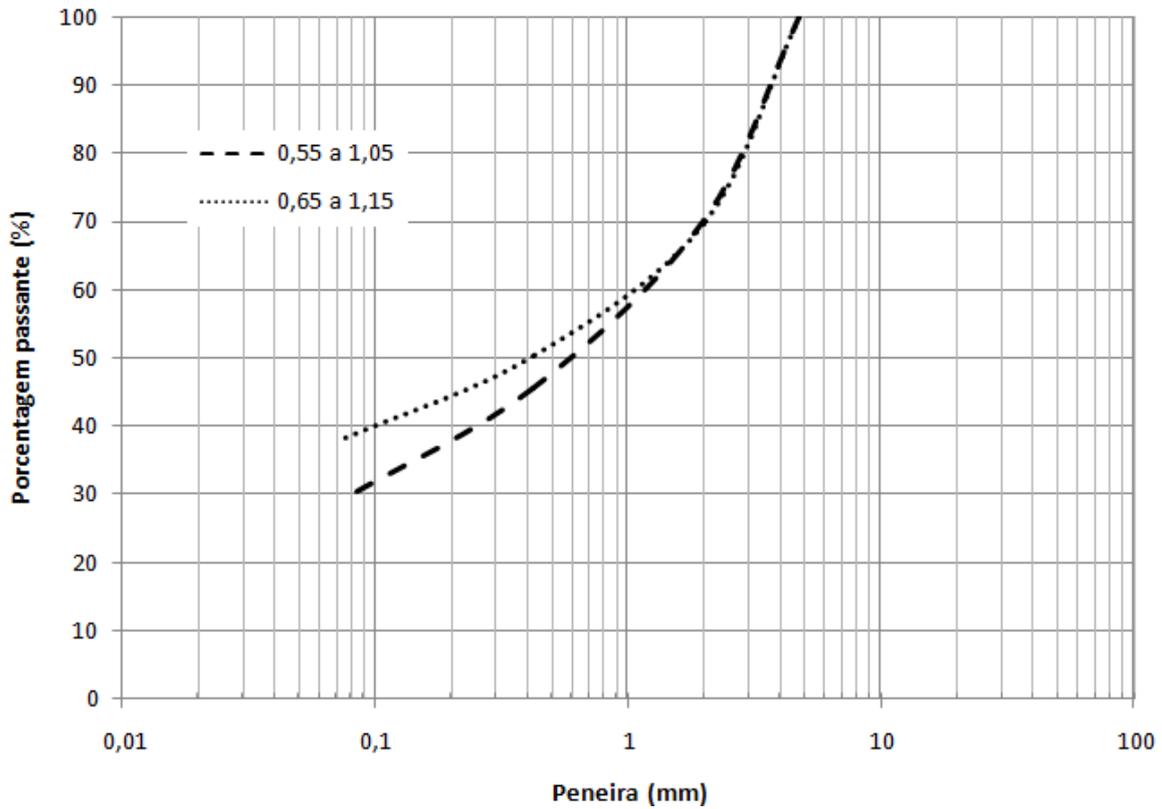


Figura 3.4 - Análise granulométrica do subleito natural.

Tabela 3.3 - Classificação e característica do subleito.

Furo	Classificação		I.S.C.				Tipo de solo
	IG	HRB	γ_s (kN/m ³)	Hot (%)	Expansão (%)	ISC (%)	Classificação visual
1	1	A-4	17,26	10,23	1,7	14,80	Argila siltosa vermelha
2	3	A-4	17,65	19,71	5,2	11,34	Argila siltosa vermelha

Tabela 3.4 - Resultados dos ensaios de índices físicos.

Furos	Índices físicos		
	LL (%)	LP (%)	IP (%)
1	26,2	16	10,2
2	24,2	16	8,0

No ábaco de dimensionamento, valores de entrada N e ISC, as camadas de pavimento são definidas, ficando conforme a Figura 3.5.

CBUQ convencional /com incorporação de borracha e madeira 5 cm
Base de brita graduada 30 cm
Subleito solo local

Figura 3.5 - Pavimento asfáltico em estudo.

3.4 MATERIAIS USADOS NA PESQUISA

3.4.1 Ligante asfáltico

O ligante asfáltico utilizado foi o CAP 50/70 produzido pela PETROBRAS, foi oriundo do campo Fazenda Alegre, no estado do Espírito Santo e processado pela LUBNOR em Fortaleza, Ceará na qual suas características estão distribuídas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Características físicas do CAP 50/70 utilizado neste estudo.

Ensaíos	Método	Resultado	Especificação
Penetração (0,1 mm)	DNER-ME 003/99	58	50-70
Viscosidade Saybolt-Furol a 160°C (segundos)	DNER-ME 004/94	92	30-150
Massa Específica (g/cm ³)	DNER-ME 193/96	1,03	Aprox.. 1 g/cm ³
Ponto de amolecimento (°C)	ABNT-NBR 6560/85	52	46
Ponto de fulgor (°C)	DNER-ME 148/94	<340	235

Fonte: Coelho (2012).

3.4.1.1 Agregados

Os agregados utilizados neste trabalho foram adquiridos da Empresa Etecon Ltda. Localizado na Rodovia Duca Serra, 600, Km02, Alvorada, Macapá-AP.

A Figura 3.6 apresenta a granulometria dos agregados utilizados nesta pesquisa. Na Tabela 3.6 estão apresentadas algumas características dos agregados. Os ensaios foram realizados através de ensaio de peneiração de material passante na peneira 19 mm, no Instituto Federal do Amapá – IFAP, campus Macapá.

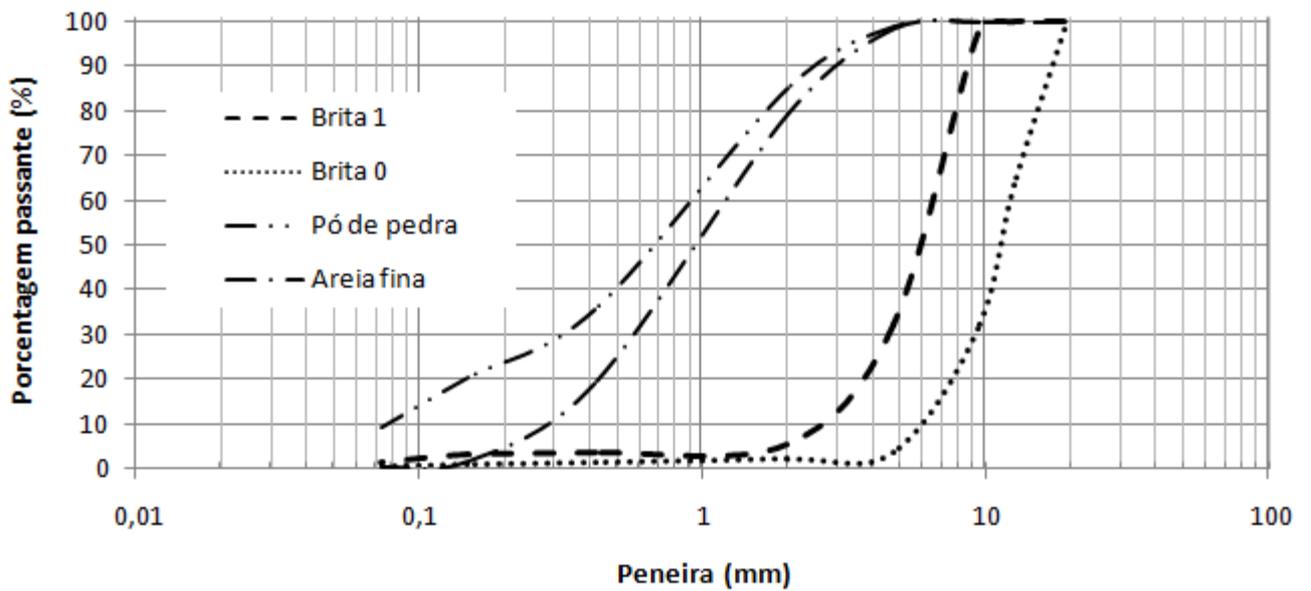


Figura 3.6 - Distribuição granulométrica dos agregados.

Tabela 3.6 – Características dos agregados utilizados.

Agregados	Características	Resultados	Norma técnica
Areia	Massa espec. (g/cm ³)	2,56	NBR NM 52 (2009)
	Módulo de finura (%)	1,92	NBR NM 248 (2003)
Pó de pedra	Massa espec. (g/cm ³)	2,76	NBR NM 52 (2009)
	Módulo de finura (%)	1,72	NBR NM 248 (2003)
Brita 0	Massa espec. (g/cm ³)	2,31	NBR NM 52 (2009)
	Módulo de finura (%)	5,23	NBR NM 248 (2003)
Brita 1	Massa espec. (g/cm ³)	2,88	NBR NM 52 (2009)
	Módulo de finura (%)	6,45	NBR NM 248 (2003)

3.4.2 Borracha

Foi usada neste trabalho, borracha proveniente de pneu triturado obtida através da preparação para o processo de recauchutagem, como mostra a Figura 3.7. Onde foram feitos testes para análise do percentual e granulometria de borracha nas misturas asfálticas. A

borracha foi cedida para tal experimento pela empresa RPM Vipal Borrachas S.A., localizada no bairro Amazonas, Rua Mita Cordeiro, Macapá - AP



Figura 3.7 – Borracha reciclada de pneu moída utilizada na pesquisa.

A borracha utilizada na composição dos agregados e do CAP 50/70 foi cisalhada mecanicamente. A borracha moída de pneu foi extraída após o processo de recauchutagem, passando na peneira de malha quadrada nº 80. Neste trabalho, B atua na elasticidade do composto em estudo, a distribuição granulométrica da borracha se encontra na Figura 3.8. Estudos comprovam que borracha moída tende a formar uma estrutura em cadeia quando misturada a altas temperaturas (Deng *et al.*, 2017).

3.4.3 Madeira

O resíduo de madeira dura obtida em serraria da região. Foram recolhidos cerca de 60 kg de resíduo de madeira dura (S), sendo cerca de 30 kg utilizados na produção. O resíduo de madeira dura foi previamente peneirada de modo a utilizar somente material fino, sendo eliminadas partículas retidas na peneira 4,76 mm (Figura 3.8).

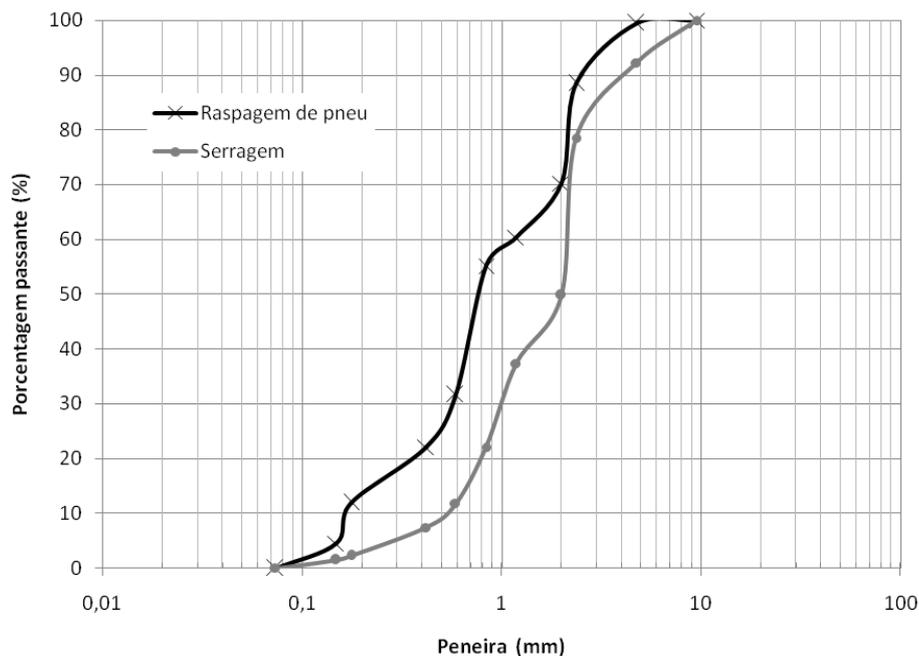


Figura 3.8 - Análise granulométrica da Borracha de pneu e resíduo de madeira dura em estudo.

3.5 TESTES DE CISALHAMENTO OSCILATÓRIO

Para ensaios de reologia em modo oscilatório, foram feitas misturas de material arenoso para cisalhamento de borracha e resíduo de madeira dura. Os asfaltos modificados foram investigados quanto à sua compatibilidade de ligação (CHEN *et al.*, 2019), o composto CAP 50/70 e S/B/arenoso. Assim, as características reológicas do ligante CAP 50/70 e S/B/arenoso foram examinadas usando um reômetro de placa HAAKE placa/placa, modelo RheoStress 6000, com um diâmetro de 35 mm e 1 mm de abertura, sensor tipo PP35, um controlador térmico tipo RS 6000 e temperatura de 180°C. A viscosidade e rigidez dos compostos foram registradas.

A Tabela 3.7 mostra as dosagens utilizadas para o teste de reologia e a porcentagem em peso, representada pelo símbolo dR^e (d , porcentagem de asfalto CAP 50/70 na mistura asfáltica; e , porcentagem de S/B/arenoso na matriz asfáltica).

Tabela 3.7 - Dosagem composta para testes de reologia CAP 50/70 e S/B/arenoso.

%	$7R^3$	$7R^{4,5}$	$7R^6$	$7,5R^3$	$7,5R^{4,5}$	$7,5R^6$	$8R^3$	$8R^{4,5}$	$8R^6$
CAP 50/70	70,0	60,9	53,8	71,4	62,5	55,6	72,7	64,0	57,1
S	6,3	8,2	9,7	6,0	7,9	9,4	5,7	7,6	9,0
B	7,9	10,3	12,1	7,5	9,9	11,7	7,2	9,5	11,3
Arenoso	15,8	20,6	24,3	15,0	19,7	23,4	14,4	18,9	22,6

Em compostos poliméricos, polímeros, quando fundidos em asfalto, possuem comportamento newtoniano e quando taxas de cisalhamento impostas são muito baixas,

podemos descrever através da viscosidade (η) versus taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) onde, neste caso, há uma tendência do asfalto modificado a viscosidade diminuir como o aumento da taxa de cisalhamento. Isso pode ser descrito pela lei de potência, modelo de Ostwald de Weale, representada pela Equação 3:

$$\eta = m \dot{\gamma}^{n-1} \quad (3)$$

onde m é a consistência e n é o índice da lei de potência.

Quando $n = 1$, o material exibe comportamento newtoniano. Quando $n > 1$, o material exibe comportamento dilatador e, quando $n < 1$, o material exibe comportamento pseudoplástico. Os compostos poliméricos em matriz asfáltica geralmente caem na última categoria.

A caracterização reológica é baseada em métodos reológicos não-lineares a partir da análise de módulo complexo de asfalto e asfalto modificado de acordo com a equação de cisalhamento (γ_{xy}) em um intervalo que varia com o tempo senoidal (ou cosseno), como mostrado Equação 4:

$$\gamma_{xy}(t) = \gamma_0 e^{i\omega t} \quad (4)$$

γ_{xy} é uma função complexa e γ_0 é a amplitude da deformação (positiva) mostrada na Equação 5.

Diferenciando da Equação 3, onde se tem a taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) versus tempo (t), como mostrado na Equação 6.

$$e^{i\omega t} = \cos(\omega t) + i \sin(\omega t) \quad (5)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma_{xy}}{dt} = \gamma_0 i \omega e^{i\omega t} = \dot{\gamma}_0 i e^{i\omega t} \quad (6)$$

Onde ω é a frequência e $\dot{\gamma}_0 = \gamma_0 \omega$ é a amplitude da taxa de cisalhamento positiva.

A tensão de cisalhamento oscila, mas é atrasada na mesma frequência. A tensão de cisalhamento é representada pela Equação 7:

$$\tau_{yx}(t) = \tau_0 e^{i(\omega t + \delta)} \quad (7)$$

onde δ é o ângulo de fase.

Para fluxo constante, a Equação 8 mostra a relação entre a tensão de cisalhamento, Equação 4, e deformação, Equação 3.

$$G^* = \frac{\tau_{yx}(t)}{\gamma_{xy}(t)} = \left[\frac{\tau_0}{\gamma_0} \cos(\delta) \right] + i \left[\frac{\tau_0}{\gamma_0} \text{sen}(\delta) \right] \quad (8)$$

onde G^* é o módulo de cisalhamento complexo.

Mesmo dentro do regime viscoelástico linear, os asfaltos, bem como sólidos elásticos e fluidos viscosos, têm uma resposta na forma de tensão de cisalhamento que é sinusoidal em fase com o mesmo número de onda. No entanto, como os materiais têm características viscoelásticas, a defasagem ocorre e é comparada à curva de deformação (Figura 3.9).

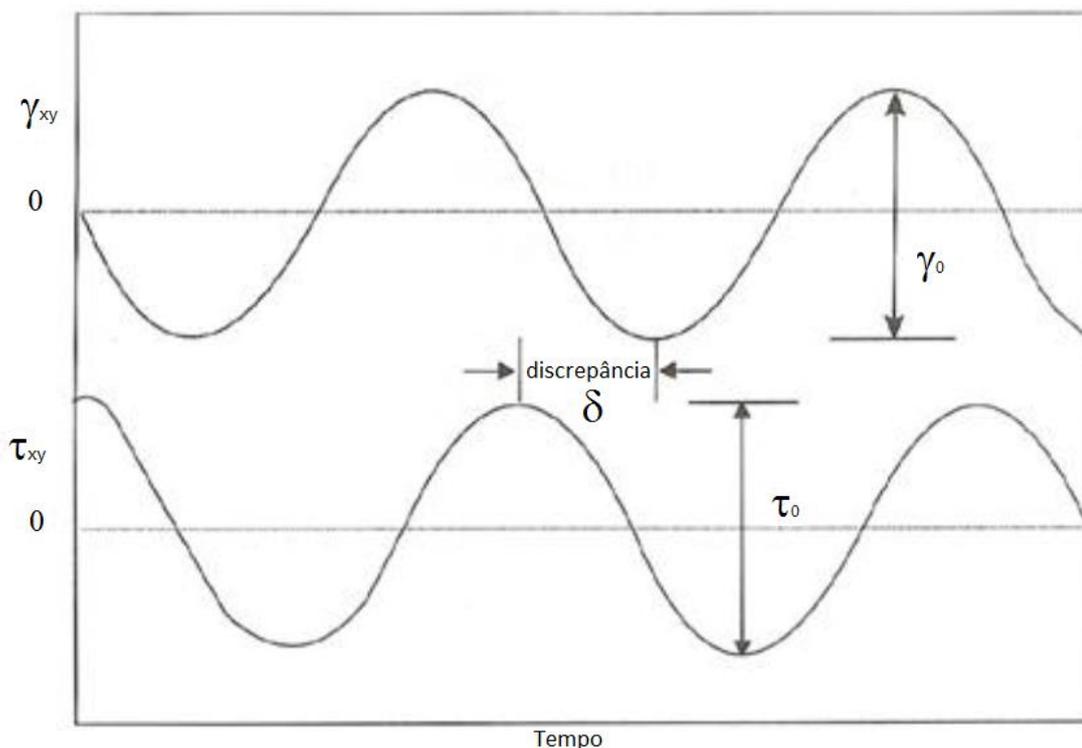


Figura 3.9 - Fluidos viscosos em teste dinâmico mecânico.

O tipo de asfalto modificado usado neste trabalho e suas respectivas deformações são, por outro lado, fatores importantes para combater a deformação permanente. A mistura torna-se mais resistente à deformação permanente, aumentando a viscosidade do ligante e de

acordo com o efeito benéfico do retorno elástico na redução da energia de deformação. Um módulo complexo maior, é seguido de uma maior resistência à deformação.

3.6 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

3.6.1 Microscopia Eletrônica de Varredura com Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios X

Para caracterização física, no que diz respeito, a formato e textura dos grãos, foram realizadas junto ao Instituto Federal do Pará - IFPA (campus Belém) a preparação das amostras (metalização com ouro em atmosfera de vácuo) e a realização de ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura –MEV (Figura 3.10).

O microscópio eletrônico de varredura utilizado para análise morfológica foi de modelo LEO-1430. As amostras foram metalizadas com platina e o tempo de recobrimento foi de 2,0 min. Na análise de imagens de elétrons secundários ocorreu devido às seguintes condições: corrente de feixes de elétrons de 90 μ A, voltagem de aceleração constante de 10 kV.

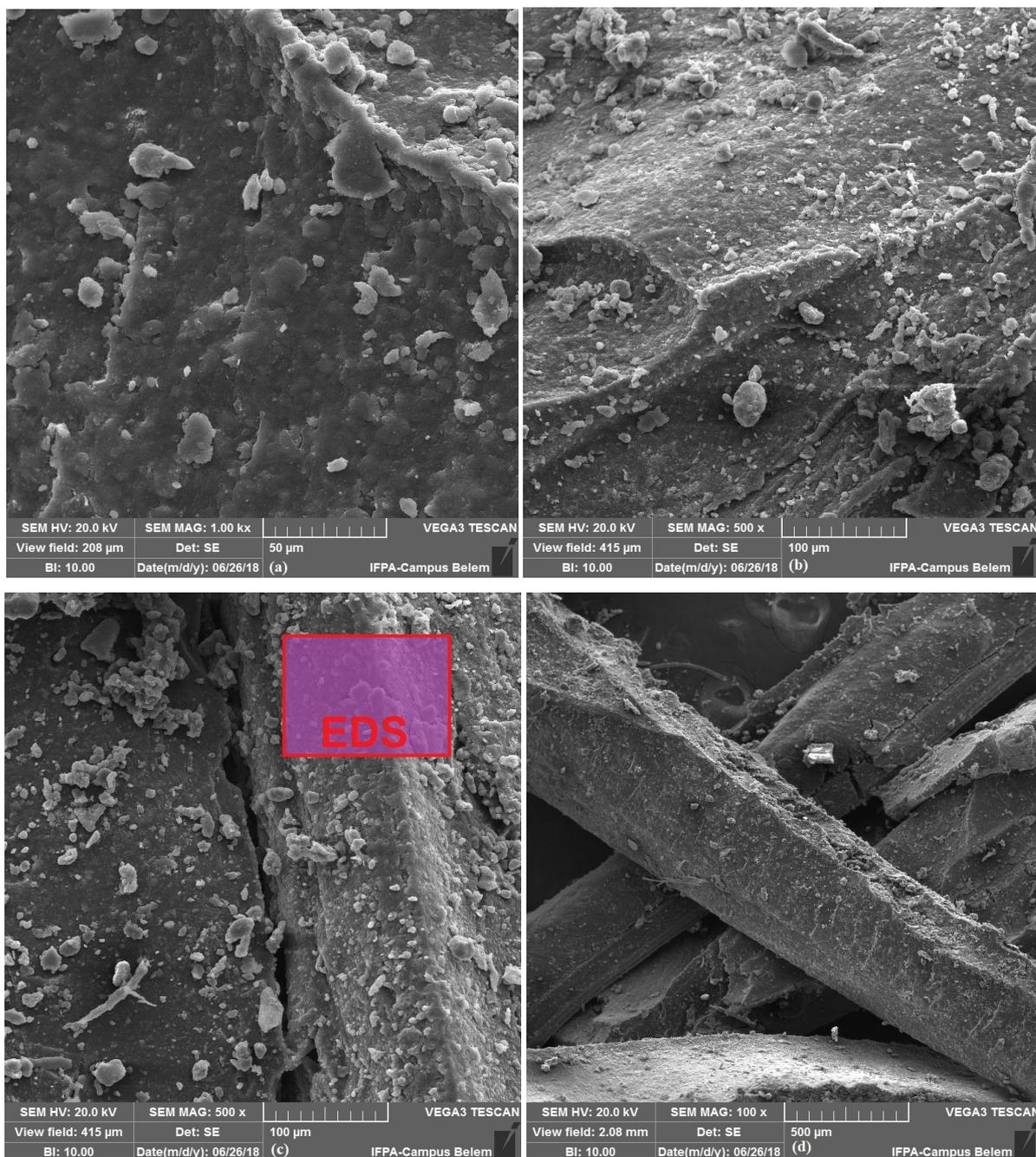


Figura 3.10 - Microscopia eletrônica de varredura de amostras de madeira/borracha aumento de x1000 (a), x500 (b), x500(c) e x100 (d).

Observa-se a borracha cisalhada por material arenoso de jazida local (Figura 3.10a). Na Figura 3.10b tem-se a borracha cisalhada contendo resíduo de madeira dura contida na sua estrutura. Em Figura 3.10c, amostras de resíduos de madeira dura e arenoso na estrutura da borracha.

Pode-se observar a interação do composto madeira/borracha ao ampliar a objetiva para x100 (Figura 3.10d), formação do composto devido o aquecimento e inserção da fibra de

madeira em estrutura de borracha de pneu reciclada. Isso favorece maior elo físico entre o composto e o asfalto em estudo.

A Figura 3.11 indica as superfícies dos depósitos obtidos em relação a suas propriedades e composição do composto madeira/borracha referente a Figura 3.10c.

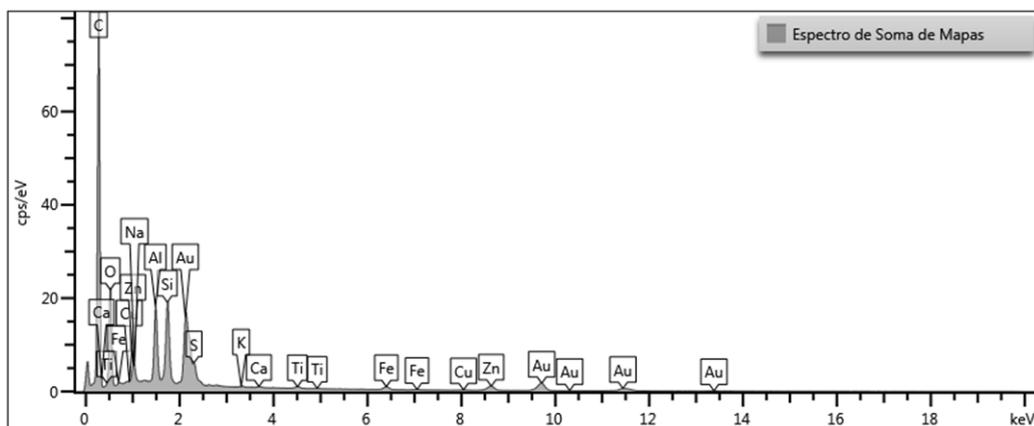


Figura 3.11 - Gráfico da análise elementar do composto madeira/borracha.

3.6.2 Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral

O ensaio para determinação da resistência à tração por compressão diametral é realizado de acordo com as recomendações do método de ensaio DNER-ME 138/94. O ensaio consiste na utilização de uma prensa Marshall convencional adaptada com dois frisos metálicos, com o objetivo de encontrar o valor da carga de ruptura, e assim calcular a resistência à tração por compressão diametral.

3.6.3 Ensaio de Estabilidade Marshall

Embora toda a primeira etapa dos ensaios tenha sido baseada na metodologia Marshall, segundo os procedimentos recomendados pelo método de ensaio DNER-ME 043/95, inclusive com a determinação de diversos parâmetros desta metodologia, optou-se pela realização do ensaio de estabilidade somente para o teor ótimo da mistura. Isto porque a estabilidade não é parâmetro de projeto da especificação de serviço seguida nesta pesquisa.

O comportamento de deformação da mistura drenante difere da mistura densa convencional.

Assim, torna-se difícil avaliar a resistência à fluência da mistura por meio do ensaio de estabilidade Marshall. Apesar disso, segundo a Associação das Rodovias do Japão (1996), boa parte das pavimentações drenantes no país tem especificado no projeto de dosagem um

valor de estabilidade Marshall mínimo de 3,5 kN, e na maioria dos casos, o pavimento drenante tem apresentado boa durabilidade.

Segundo a norma brasileira DNER-ME 043/95 os valores de estabilidade para 75 golpes têm que ser de no mínimo 4,9 kN e segundo a norma DNER-ME 138/94 a resistência a tração por compressão diametral estática a 25°C, deve-se obedecer o mínimo de 0,65 MPa.

3.6.4 Módulo de resiliência (MR)

Módulo de resiliência é determinado em ensaio de carga repetida. Valores de pico das tensões e das deformações recuperáveis que ocorrem nos ensaios são usados para calcular a constante elástica resiliente mesmo que a tensão de pico ou deformação recuperável não ocorra ao mesmo tempo em um teste dinâmico deste tipo.

O ensaio de módulo de resiliência surgiu a partir dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral quando optou-se por determinar o módulo de elasticidade dinâmico de misturas betuminosas e materiais cimentados (Figura 3.12).

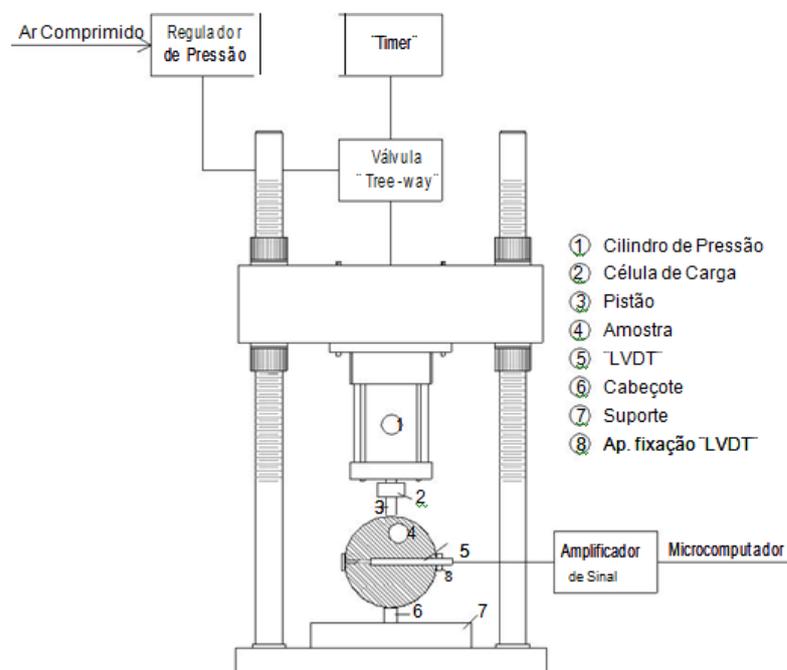


Figura 3.12– Representação do equipamento para ensaio de módulo de resiliência.

O ensaio de módulo de resiliência é normatizado no Brasil pela norma DNER-ME 133/94, de utilidade para projeto de pavimentos flexíveis e em linhas gerais, os procedimentos para o ensaio são:

a) Moldagem do corpo-de-prova conforme procedimentos descritos no ensaio Marshall.

b) Posiciona-se o corpo-de-prova na base da estrutura de suporte, entre dois cabeçotes curvos.

c) Fixa-se e ajusta-se os transdutores mecânico-magnéticos tipo LVDT (Linear variable differential transformer) de modo a se obter o registro dos deslocamentos.

d) Observa-se o perfeito assentamento do pistão de carga e dos cabeçotes no corpo-de-prova.

e) Aplica-se 200 vezes uma carga vertical repetida (F) diametralmente no corpo-de-prova, de modo a se obter uma tensão (σ) menor ou igual a 30% da resistência à tração determinada no ensaio de compressão diametral estático. Recomenda-se a aplicação da menor carga (F), capaz de fornecer um registro mensurável. A frequência de aplicação da carga (F) é de 60 ciclos por minuto com duração de 0,10 segundo. Registra-se o deslocamento resiliente para 300, 400 e 500 aplicações de carga (F).

f) Com os valores obtidos são calculados os módulos de resiliência (Equação 9).

$$MR = \frac{F(0,997 \mu + 0,2692)}{100 \Delta h} \quad (9)$$

Onde:

MR = módulo de resiliência, MPa.

F = carga vertical repetida aplicada diametralmente no corpo-de-prova, N.

Δ = deformação elástica ou resiliente registrada no oscilógrafo, para 300, 400 e 500 aplicações de carga (F), cm.

h = altura do corpo-de-prova, cm.

μ = coeficiente de Poisson.

Para uma descrição adequada das características resilientes de um material, são requeridos cinco parâmetros:

- deformação vertical devido a um incremento na tensão vertical;
- deformação radial devido a um incremento na tensão vertical;
- deformação radial devido a um incremento na tensão radial;
- deformação vertical devido a um incremento na tensão radial;
- deformação radial devido a um incremento na tensão radial em uma direção perpendicular à deformação.

É o ensaio de compressão diametral cíclica, para determinação de características resilientes das misturas. Na qual, obtêm-se informações sobre o coeficiente de Poisson do material, ou seja, determinação das deformações longitudinais e transversais do material em estudo.

Segundo BERNUCCI *et al.* (2008), valores típicos de MR, como ordem de grandeza para simples orientação do leitor, podem ser considerados na faixa de 2000 a 8000 MPa para concretos asfálticos a 25°C, sendo os menores correspondentes a misturas com asfaltos modificados por polímeros ou por borracha e os maiores a misturas com asfaltos de consistência dura.

3.6.5 Resistência a tração (RT)

De acordo com as normas vigentes (ABNT NBR 15087; DNER-ME 138), o cálculo da RT para misturas asfálticas assume que o corpo-de-prova rompe devido à tensão de tração uniforme gerada ao longo do diâmetro solicitado que se iguala à tensão máxima admissível do material ($\sigma_{adm} = RT$), que está em regime elástico durante todo o ensaio (Equação 10).

$$RT = \frac{2F}{100 DH} \quad (10)$$

RT – resistência à tração, MPa;

F – carga de ruptura, N;

D – diâmetro de corpo-de-prova, cm;

H – altura do corpo-de-prova, cm.

Há uma boa correlação entre MR e RT para cada tipo de mistura asfáltica, porém particularizada para cada “família” de composição granulométrica e de ligantes. Essa relação permanece constante com o passar do tempo, ou seja, com o envelhecimento. Segundo BERNUCCI *et al.* (2008), os valores entre MR e RT, para concreto asfáltico de referência (faixa C do DNIT) o valor mínimo é de 3760 (adimensional), enquanto para asfaltos-borracha (via seca) de 3065 (adimensional).

3.7 PROJETOS DE MISTURA ASFÁLTICA

A graduação utilizada para as misturas foi a Faixa C do DNIT. O projeto das misturas asfálticas convencional e com incorporação de madeira/borracha de pneu foram definidos e analisados seguindo a metodologia Marshall.

As características e comportamento das misturas foram avaliados: estabilidade e fluência pela metodologia Marshall; densidade da mistura asfáltica; volume de vazios; relação betume-vazios; módulo de resiliência; resistência à tração por compressão diametral.

3.7.1 Composição granulométrica e dosagem Marshall

A Tabela 3.11 e Tabela 3.12 a composição granulométrica dos agregados e a Figura 3.13 mostram a especificação da mistura asfáltica convencional e modificada com madeira/borracha.

Tabela 3.8 - Granulometria dos agregados para mistura asfáltica convencional na faixa especificada pelo DNIT.

Peneira	mm	Limite%		Centro faixa%	Faixa de Trabalho%		Mistura%
3/4"	19,1	100	100	100	100	100	100
1/2"	12,7	90	100	95	90	95	93,1
3/8"	9,5	80	92	86	80	92	82,8
n 4	4,76	62	77	69,5	62	77	68
n 10	2	42	57	49,5	42	57	45,5
n 40	0,42	18	29	23,5	18	29	24,5
n 100	0,149	10	20	15	10	20	16,4
n 200	0,074	5	8	6,5	5	8	7,1

Tabela 3.9 - Granulometria dos agregados para mistura asfáltica com madeira/borracha na faixa especificada pelo DNIT.

Peneira	mm	Limite%		Centro faixa%	Faixa de Trabalho%		Mistura madeira/borracha%
3/4"	19,1	100	100	100	100	100	100
1/2"	12,7	90	100	95	90	95	90,3
3/8"	9,5	80	92	86	80	92	81,2
n 4	4,76	62	77	69,5	62	77	66
n 10	2	42	57	49,5	42	57	48
n 40	0,42	18	29	23,5	18	29	25,2
n 100	0,149	10	20	15	10	20	16,8
n 200	0,074	5	8	6,5	5	8	7,6

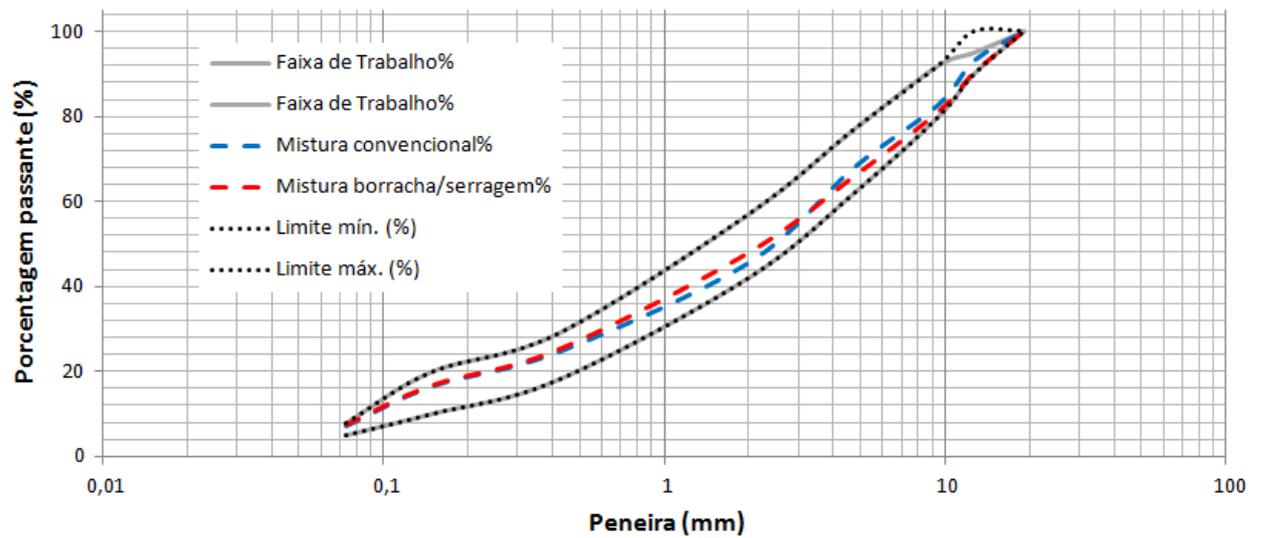


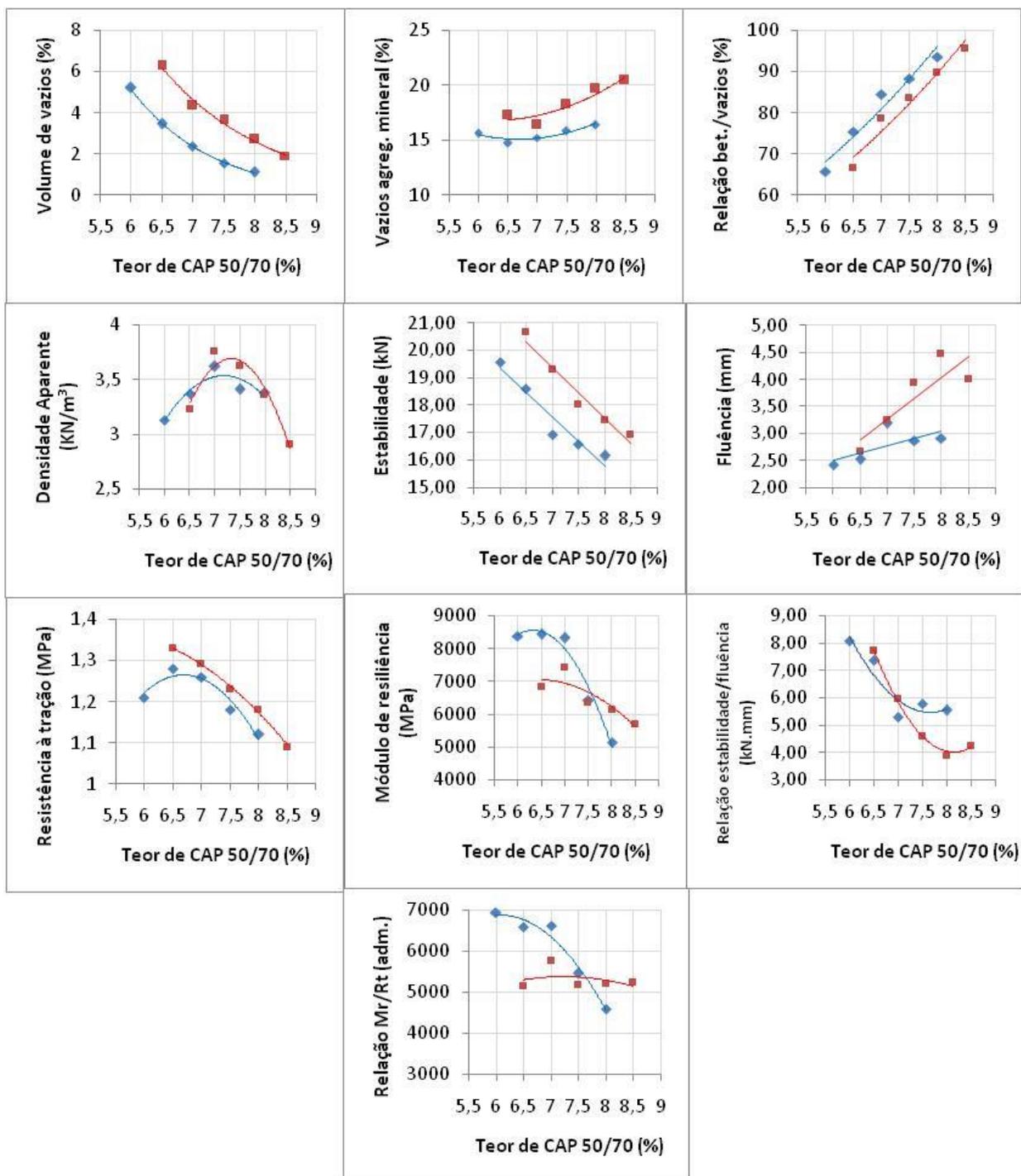
Figura 3.13 - Composição granulométrica dos agregados convencionais sem e com madeira/borracha.

3.7.2 Dosagem Marshall

Foram moldadas 25 amostras cilíndricas (5 para cada teor de betume), para determinação do teor de ligante e realização de ensaios mecânicos, sendo 25 corpos-de-prova para a mistura asfáltica convencional e 25 corpos-de-prova para mistura asfáltica com incorporação de borracha reciclada de pneus e resíduo de madeira dura. As misturas com incorporação de borracha de pneus foram mantidas aquecidas por 1 hora, após a mistura e antes da compactação. A Tabela 3.10 mostra as propriedades finais das misturas e os gráficos da Figura 3.14 mostram os resultados volumétricos e ensaios mecânicos.

Tabela 3.10 – Propriedades das misturas asfálticas.

Asfalto Convencional										
Teor de CAP 50/70 (%)	Volume de vazios (%)	Vazios agregado mineral (%)	Relação betume/vazios (%)	Densidade Aparente (KN/m ³)	Estabilidade (kN)	Fluência (mm)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de resiliência (MPa)	Relação estabilidade/fluência (kN.mm)	Relação Mr/Rt (adm.)
6	5,22	15,62	65,69	3,13	19,57	2,42	1,21	8386,34	8,09	6930,86
6,5	3,47	14,73	75,42	3,37	18,59	2,52	1,28	8437,45	7,36	6591,758
7	2,39	15,26	84,58	3,62	16,91	3,19	1,26	8325,67	5,30	6607,675
7,5	1,56	15,84	88,32	3,41	16,58	2,87	1,18	6435,89	5,79	5454,144
8	1,12	16,39	93,64	3,38	16,15	2,91	1,12	5134,78	5,55	4584,625
Asfalto modificado com borracha/serragem										
Teor de CAP 50/70 (%)	Volume de vazios (%)	Vazios agregado mineral (%)	Relação betume/vazios (%)	Densidade Aparente (KN/m ³)	Estabilidade (kN)	Fluência (mm)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de resiliência (MPa)	Relação estabilidade/fluência (kN.mm)	Relação Mr/Rt (adm.)
6,5	6,28	17,25	66,43	3,23	20,65	2,67462	1,33	6847,78	7,72	5148,707
7	4,36	16,38	78,45	3,76	19,28	3,24358	1,29	7435,67	5,94	5764,085
7,5	3,64	18,29	83,62	3,62	17,99	3,93192	1,23	6345,89	4,58	5159,26
8	2,72	19,66	89,75	3,36	17,42	4,46532	1,18	6134,54	3,90	5198,763
8,5	1,91	20,44	95,61	2,91	16,92	3,99542	1,09	5696,56	4,24	5226,202



— Asfalto Convencional
 — Asfalto modificado com Madeira/borracha

Figura 3.14 - Propriedades das misturas asfálticas convencional e incorporada com borracha reciclada de pneus e resíduo de madeira dura.

No que diz respeito a parâmetros volumétricos, o volume de vazios é maior nas amostras de asfalto com o composto em estudo, pois seu acréscimo aumenta os vazios da amostra, a mesma relação para os vazios no agregado mineral, considerando a mistura via

seca, considera-se o material composto em estudo como agregado. Na relação betume/vazios, podemos observar que os agregados com asfalto são mais envolvidos por CAP 50/70 comparado a asfaltos com o composto em estudo.

A avaliação mecânica tem a densidade aparente e a estabilidade para maiores valores de asfaltos com o composto em estudo, logo a fluência estando relacionada aos valores de volume de vazios, sendo maior para o asfalto modificado.

Na Figura 3.14, a resistência à tração por compressão diametral é maior para valores de asfalto modificado devido a vínculo físico do asfalto com o composto em estudo. O módulo de resiliência das amostras de asfalto convencional são maiores até 7,5% de betume, após os valores de resiliência, elasticidade na tração de asfaltos, são maiores com asfaltos modificados, que pode reduzir os riscos de deformação permanente em pavimentos. O mesmo acontece com a relação estabilidade/fluência a 7,5% de asfalto, a borracha modificada passa a ter melhor comportamento quanto a estabilidade e fluência. O comportamento a fadiga de asfaltos modificados é melhorado a partir de 8% de CAP 50/70, como mostra a relação módulo de resiliência e resistência a tração (M_r/R_t), o aumento da quantidade de CAP 50/70 na mistura proporcionou um melhor envolvimento do ligante com os agregado convencionais e o composto em estudo, proporcionando melhor comportamento à fadiga.

CAPITULO 4 – EXECUÇÃO DA PISTA EXPERIMENTAL

Neste capítulo será abordado a aplicação de asfalto convencional e asfalto modificado no trecho em estudo. Equipamentos usados para a confecção do composto madeira/borracha, máquinas usadas na pavimentação asfáltica.

4.1 INFRAESTRUTURA

A marcação da obra iniciou com a equipe de topografia da ETECON LTDA. de acordo com o projeto geométrico. Após a marcação da obra, iniciaram-se as obras de drenagem superficial, executados pela Prefeitura de Macapá. Foram feitas as redes pluviais e executadas as bocas de lobo para captação de águas superficiais. A rede coletora de esgoto já estava implantada sob o subleito da via, executados pela Prefeitura de Macapá. Após a conclusão das obras de drenagem superficial e rede de esgoto, iniciou-se a terraplenagem.

O ensaio de compactação na energia do Proctor Modificado conduziu a um peso específico aparente máximo de 27,45 kN/m³, correspondente a um teor ótimo de umidade de 8,56 % e grau de compactação de 102,23% e I.S.C. máximo de 75,73%. Logo após, iniciou-se a execução da base de brita graduada com espessura de 20 cm, conforme a definição da estrutura do pavimento.

Sobre a superfície da base de brita graduada concluída foi executada a imprimação asfáltica com o produto CM-30, com taxa de aplicação de 1,0 l/m². Em seguida, foi executada a colocação dos meios-fios.

4.2 REVESTIMENTO ASFÁLTICO CONVENCIONAL

O concreto asfáltico foi produzido na Usina do DETRAP, da Prefeitura de Santana-AP, no Bairro Distrito industrial, localizada na Rodovia Macapá-Mazagão.

Com a determinação da mistura asfáltica: teor de ligante, composição granulométrica, temperaturas de misturas e compactação, a usina foi calibrada. A Figura 4.1a mostra a cabine de controle da usina gravimétrica, onde são feitos o controle da fabricação de concreto asfáltico convencional. Os agregados estavam dispostos em 4 silos (Figura 4.1b). A temperatura de secagem dos agregados no secador rotativo da usina gravimétrica é em torno de 200 °C. A mistura asfáltica é descarregada em caçambas para transporte até a rodovia a ser

pavimentada a temperatura foi controlada por um termômetro bimetálico, faixa de medição de 0° a 180°. A Tabela 4.1 mostra as informações relacionadas à execução do trecho.



Figura 4.12 – Mistura asfáltica: usina de asfalto móvel CYBER, descarregamento de asfalto em caminhão basculante 6x4 (a); silos usina de asfalto Kompak 500 (b).

Tabela 4.3- Informações relacionadas à execução do trecho com concreto asfáltico convencional.

Horário do início de execução	9:00 h
Temperatura às 8:00 e 9:00 h	31 e 32 °C
Umidade do ar às 9:00 e 11:00 h	77 e 68%
Temperatura da massa no caminhão	170 °C
Temperatura de aplicação	165 °C
Rolo pneumático liso 176,51 kN	18 passadas
Rolo liso 98,07 kN sem vibração	10 passadas
Temperatura de compactação	110 °C
Densidade aparente	2,69 kN/m ³
Grau de Compactação	98,43%

4.3 REVESTIMENTO ASFÁLTICO COM INCORPORAÇÃO DE BORRACHA RECICLADA DE PNEUS

Para obtenção do composto foram feitas as misturas com auxílio de uma betoneira (figura 4.2a) aquecida com material inflamável descartado de obra de construção (Figura 4.2b), a temperatura de 180 °C durante 15 min. Na betoneira ocorreu a mistura de madeira/borracha para confecção do compósito (Figura 4.2c). O composto usado na mistura madeira/borracha foram ensacados e armazenados em laboratório (Figura 4.3a). O composto madeira/borracha foi inserido na correia transportadora da usina de asfalto móvel para mistura com os agregados via seca (Figura 4.3b) e depois de processados em usina gravimétrica

móvel (mistura dos Agregados pó de pedra, Brita 0, madeira/borracha). Logo após, transportada para o local da pavimentação.



Figura 4.13 - Aquecimento dos materiais usados na pavimentação: Betoneira usada para confecção do composto (a); inserção de calor no sistema composto e betoneira (b); Composto produzido (c).



Figura 4.14 - Composto madeira/borracha: material em estoque (a); Composto madeira/borracha transportado através das correias da usina gravimétrica(b).

Desta forma, o trecho com concreto asfáltico convencional e não convencional foi executado. Foram quatro etapas para a pavimentação: confecção do composto no laboratório de mecânica dos solos do IFAP (Figura 4.4), mistura asfáltica através de usina móvel localizado no município de Santana-AP (Figura 4.5), transporte do material em estudo e pavimentação em concreto asfáltico convencional e modificado (Figura 4.6). Em Figura 4.5 mostra a descrição da composição da mistura asfáltica, em porcentagem em peso, obtida através do traço convencional cedido pela empresa e calculada através dos materiais utilizados na mistura asfáltica convencional, que este serviu de parâmetro para a confecção do traço de mistura asfáltica com madeira/borracha.

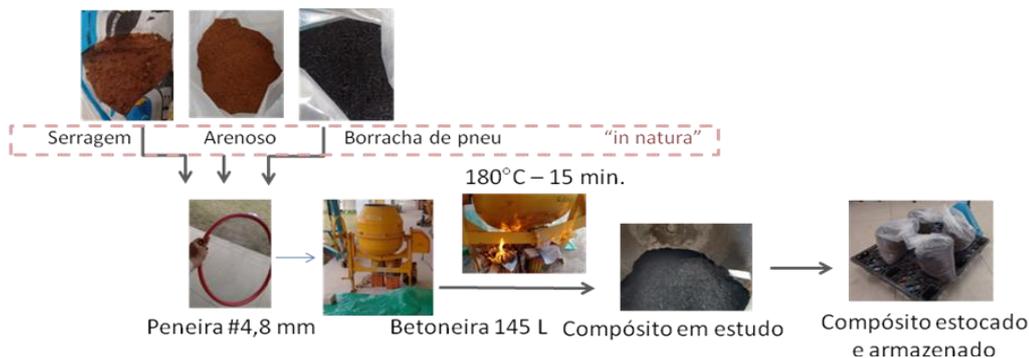


Figura 4.15 – Fluxograma da confecção do composto madeira/borracha.

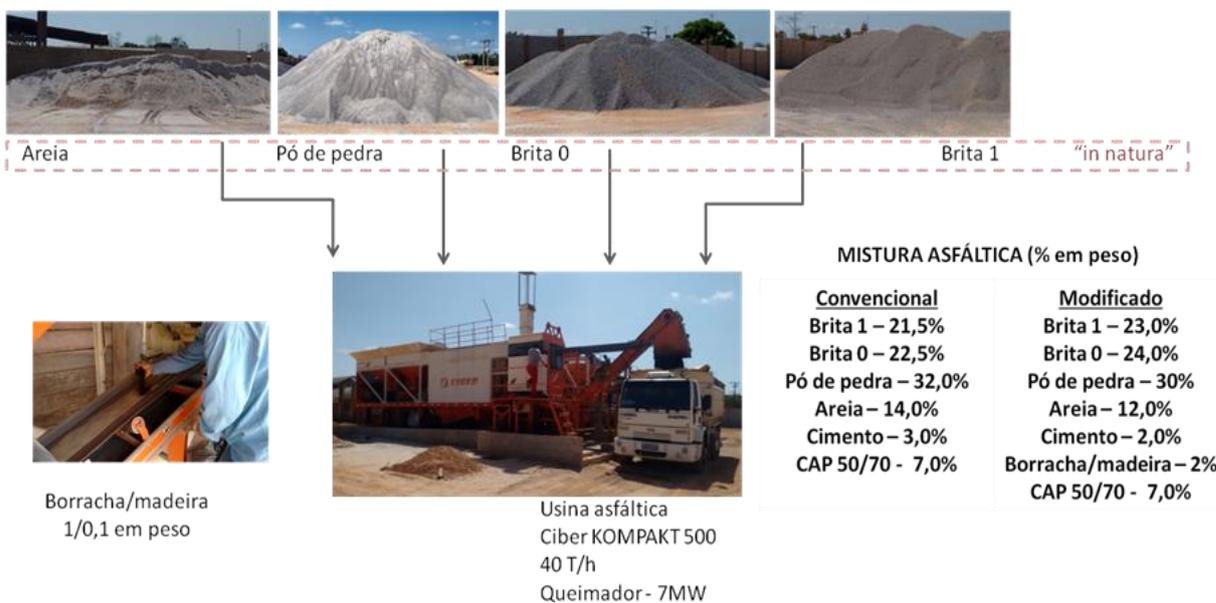


Figura 4.16 - Mistura asfáltica de asfalto com composto madeira/borracha.



Figura 4.17 - Pavimentação de trecho urbano com asfalto convencional e modificado.

Após o caminhão ser carregado, era pesado e medida a temperatura da massa asfáltica, em torno de 170 °C como preestabelecido para CBUQ (LIU; SHUKLA; NANDRA, 2017). Para aplicação do concreto asfáltico na pista foi utilizada uma vibroacabadora de pneus convencional, ver Figura 4.7. A compactação iniciou imediatamente após aplicação da massa asfáltica, com rolo do tipo pneumático, mostrado na Figura 4.8, seguido do rolo tandem, com cilindro de chapa de aço para acabamento. A Tabela 4.2 mostra a execução do asfalto de modo não convencional, com acréscimo de composto madeira/borracha.



Figura 4.18 - Vibroacabadora usada na pavimentação “in loco”.



Figura 4.19 - Rolo pneumático usado na pavimentação.

Tabela 4.4 - Informações relacionadas à execução do trecho com concreto asfáltico não convencional.

Horário da usinagem	14:35 h
Horário do início de execução	15:25 h
Temperatura às 8:00 e 9:00 h	32 e 33° C
Umidade do ar às 9:00 e 11:00 h	64 e 62%
Temperatura da massa no caminhão	175° C
Temperatura de aplicação	170° C
Rolo pneumático liso 176,51 kN	26 passadas
Rolo liso 98,07 kN sem vibração	19 passadas
Temperatura de compactação	173° C
Densidade aparente	2,79 kN/m ³
Grau de Compactação	99,39%

Comparando das Tabela 4.1 e Tabela 4.2, tem-se a aplicação dentro do padrão normativo entre 107°C a 177°C (DNIT 031/2006-ES) para a temperatura de compactação.

A Figura 4.9 mostra a rua sendo pavimentada por asfalto não convencional. A faixa de asfalto convencional foi feita um dia antes por indicações de projeto.



Figura 4. 20 - Asfalto madeira/borracha e asfalto convencional.

Devido a ocupação local, não foi possível ter acesso a ÁREA 1 do condomínio, desta forma, o material asfáltico foi aplicado na Área 2 do condomínio, lado externo ao mesmo (Figura 3.1), onde foram feitas visitas no local para averiguar o estado do pavimento quanto

ao fluxo de automóveis. O asfalto modificado já está aplicado a 50 meses na ÁREA 2, contínuo uso, no conjunto condominial em estudo. O mesmo vem sendo acompanhado durante o período de uso, como mostra a Figura 4.10 onde estão às imagens locais durante os respectivos meses de estudo.



Figura 4.21 - Gerenciamento do pavimento em estudo, durante 50 meses.

4.4. EXTRAÇÃO DE CORPO-DE-PROVA ASFÁLTICO EM CAMPO

A extração dos corpos de prova se deu no dia 20 de maio de 2018, às 10 horas no 50° mês da camada asfáltica aplicada (Figura 4.11), foram extraídos 4 corpos de prova de asfalto “in situ”, dois de asfalto convencional (Anexo IV) e dois de asfalto modificado (Anexo V). Em laboratório foram obtidas as misturas asfálticas a partir da extração de betumes.



Figura 4.22 - Extração de corpo-de-prova em campo para ensaio de extração de betume.

CAPITULO 5 – ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Neste capítulo serão abordados ensaios de laboratório, análise e apresentação dos resultados, ensaios reológicos, ensaios de propriedades volumétricas e resistência mecânica de asfaltos convencionais e asfaltos modificados com o composto madeira/borracha.

5.1. ANÁLISE DE CISALHAMENTO OSCILATÓRIO

A análise reológica do ligante e do composto S/B/arenoso foram realizadas em diferentes dosagens. A Figura 5.1 mostra os diferentes comportamentos de acordo com as dosagens apresentadas na Tabela 3.7, analisando a viscosidade ($\eta(\dot{\gamma})$) como uma função da taxa de cisalhamento. Na Figura 5.2, o módulo complexo ($G^*(\omega)$) foi medido em função da velocidade angular. Os resultados apresentados na Figura 5.1 mostram que a viscosidade aumenta em baixas taxas de cisalhamento quando são maiores em peso a composição na mistura de S/B/arenoso no ligante, e a Figura 5.2 mostra o melhor desempenho das misturas com maior dosagem de ligante e menor dosagem de S/B/arenoso quanto ao ganho de rigidez.

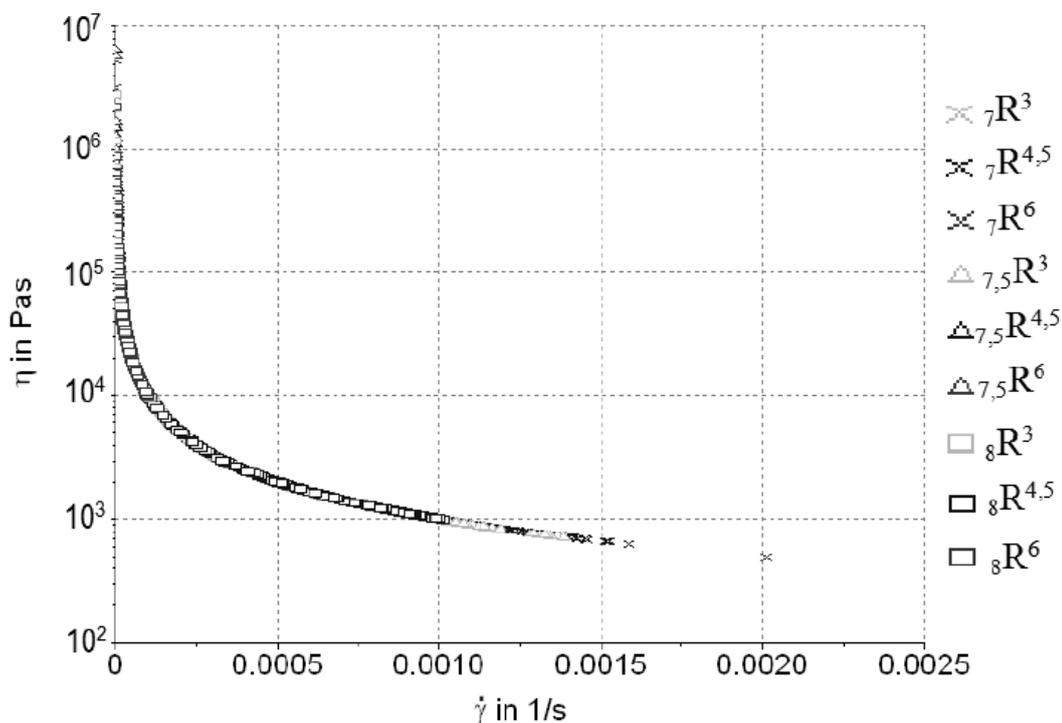


Figura 5.6 - Viscosidade (η ($\dot{\gamma}$)) em função da taxa de cisalhamento; amostras $7R^3$, $7R^{4,5}$, $7R^6$, $7,5R^3$, $7,5R^{4,5}$, $7,5R^6$, $8R^3$, $8R^{4,5}$ e $8R$.

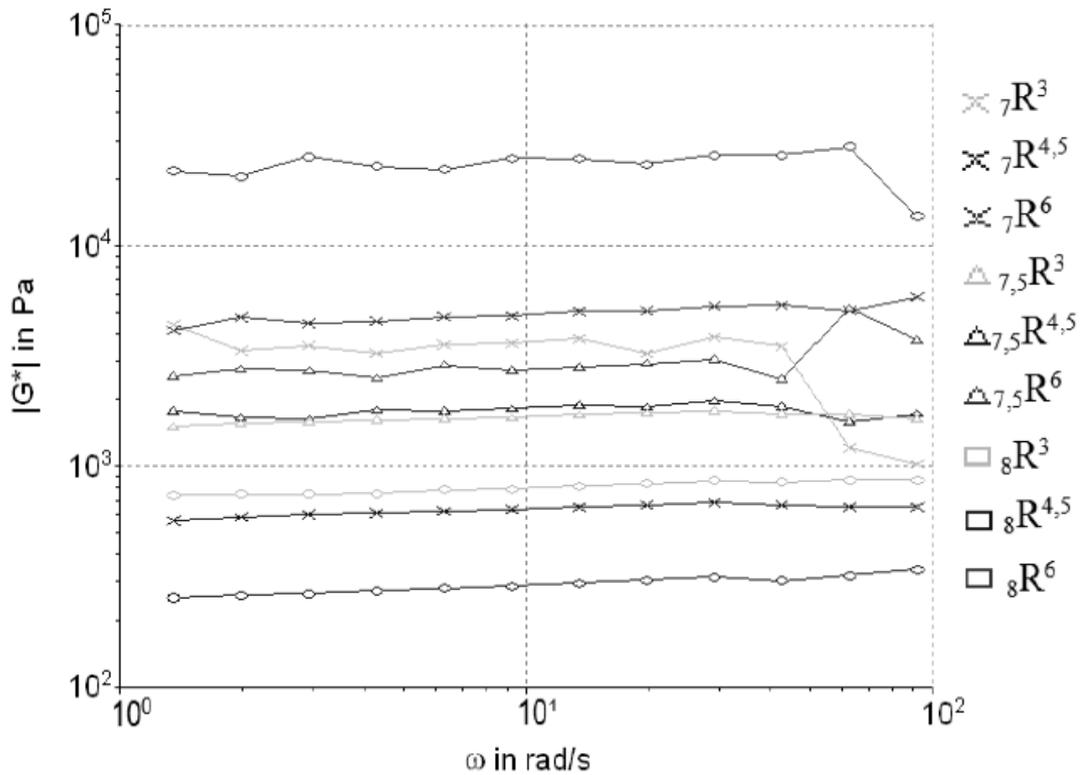


Figura 5.7 - Viscosidade (η (γ)) em função da taxa de cisalhamento; amostras $7R^3$, $7R^{4,5}$, $7R^6$, $7,5R^3$, $7,5R^{4,5}$, $7,5R^6$, $8R^3$, $8R^{4,5}$ e $8R$.

A adição de compósito elastomérico em ligante a temperaturas acima de 180 °C em baixas taxas de cisalhamento é utilizada para verificar a viscosidades de asfalto modificado (DING *et al.*, 2019). O comportamento newtoniano dos asfaltos modificados pode ser determinado com uma viscosidade decrescente e curva de deformação decrescente. As curvas de viscosidade do asfalto modificado com S/B/arenoso foram usadas para calcular a temperatura de bombeamento, compactação, usinagem e implementação de asfaltos modificados. Os asfaltos de modificados demonstraram diferentes sensibilidades e propriedades do fluido após a modificação (DING *et al.*, 2019). A Figura 5.1 mostra o comportamento da viscosidade versus a taxa de cisalhamento para asfalto puro e modificado. Existe uma tendência de o asfalto modificado ter um novo comportamento, como um aumento do comportamento pseudo-plástico a uma dada concentração do composto S/B/arenoso.

Na Figura 5.2, observa-se que, para o ligante asfáltico modificado, quanto maior a quantidade de ligante, maior o módulo complexo G^* em baixas frequências (temperaturas mais elevadas, 180°C neste estudo). Assim, a adição de S/B/arenoso ao ligante asfáltico aumentou a rigidez, logo aumenta G^* . Este resultado indica um aumento do módulo

complexo, que reflete em um asfalto de melhor qualidade, adquirindo maior resistência à deformação permanente a altas temperaturas.

5.2. PROPRIEDADES VOLUMÉTRICAS

A metodologia Marshall ainda é a mais utilizada no Brasil, devido à grande experiência acumulada em ensaios e novos equipamentos, vem sendo substituída por outros métodos de ensaio, porém estas novas técnicas modernas não apresentam disponibilidade de equipamentos para ensaio.

Neste trabalho foi utilizada a metodologia Marshall para a dosagem de misturas em laboratório, respeitando as normas nacionais vigentes no que diz respeito a misturas convencionais e misturas modificadas com borracha de pneu e madeira.

Para a determinação de parâmetros secundários de relações volumétricas necessárias durante a dosagem de uma mistura (relação betume vazios – RBV, vazios do agregado mineral – VAM e volume de vazios - Vv) é necessária utilização correta das densidades, que podem ser densidade real, aparente e efetiva.

O Volume de Vazios (Vv) é a relação de volume mais importante do concreto asfáltico, pois são necessários vazios de ar dentro da mistura compactada para permitir a expansão térmica dos ligantes, suportar a leve compactação causada pelo tráfego e responder à deformação recuperável. Volumes de vazios muito baixos (<3%) comprometem o desempenho das misturas quanto ao afundamento em Trilha de Rodas e muito altos (>8%) comprometem a durabilidade.

Os Vazios do Agregado Mineral (VAM) representam os espaços intergranular do esqueleto mineral; valores muito reduzidos de VAM tendem a teores muito baixos de ligante quando misturados com agregados, o que pode comprometer o desempenho à fadiga e a durabilidade das misturas. Valores excessivamente altos de VAM podem levar a perda de intertravamento do esqueleto mineral e redução da resistência ao cisalhamento.

Na Tabela 5.1, os valores das propriedades das misturas asfálticas dos corpos-de-prova moldados no dia da execução da pista. Nota-se que o teor de betume do concreto asfáltico convencional excedeu o limite aceitável $\pm 0,3\%$ (DNIT 031/2006). Provavelmente, isto tenha ocorrido devido a um problema de calibragem da usina gravimétrica. O volume de vazios foi obtido a partir do peso específico.

Tabela 5.3 - Propriedades de asfaltos convencionais e com incorporação do composto madeira/borracha.

Variáveis		Densidade Aparente	V _v	VAM	RBV	Teor de Betume
		(kN/m ³)	(%)	(%)	(%)	(%)
Especificação		-	3 a 5	>16	75 a 82	-
Asfalto	Convencional	3,53	3,5	15,3	84	7
	com madeira/borracha	3,76	3,7	18,3	89	7,5

Na Figura 5.3, podemos observar o gráfico com a variação dos valores constante na Tabela 5.1.

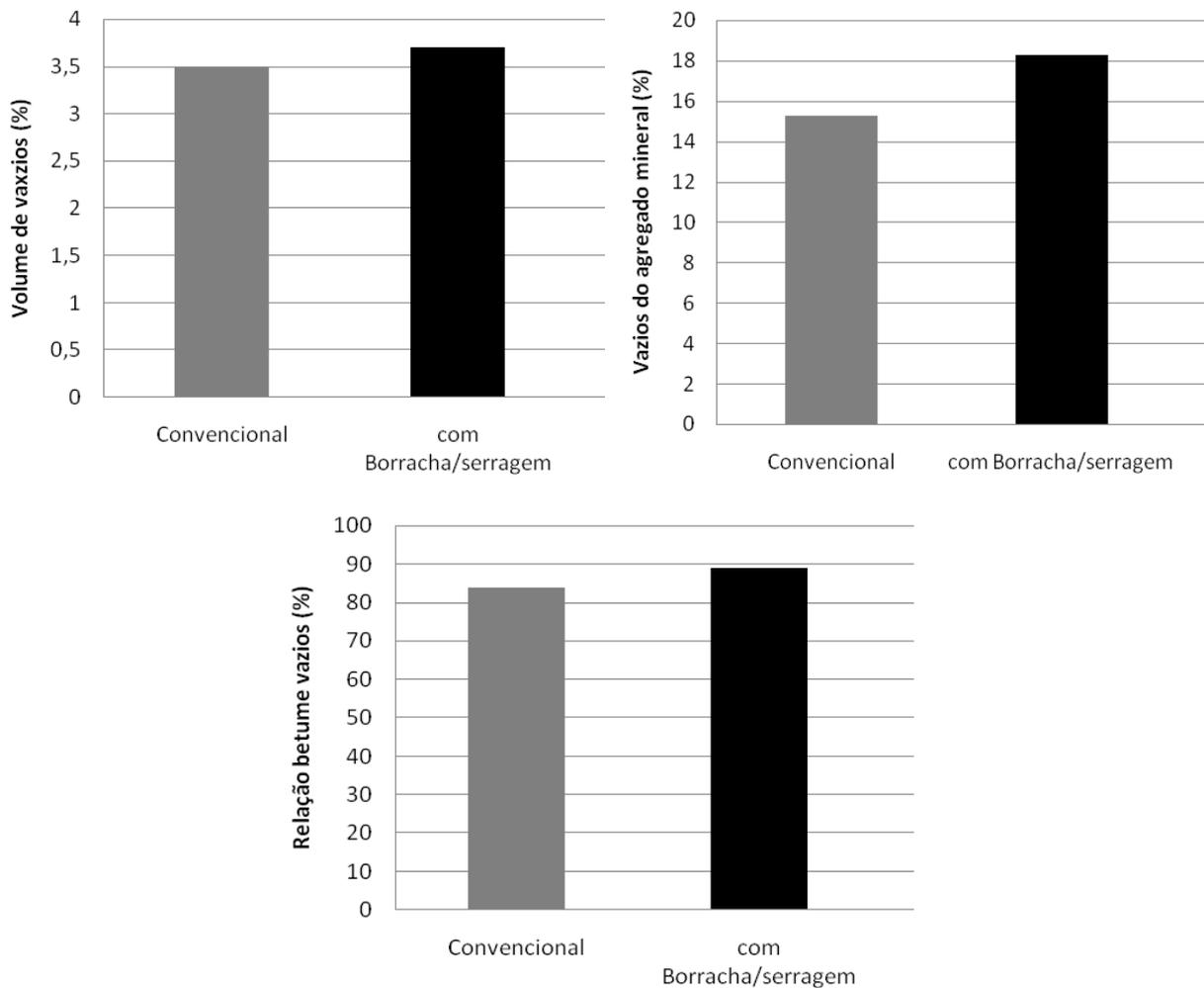


Figura 5.8 - Gráfico de volume de vazios (VV), vazios do agregado mineral (VAM) e relação betume vazios (RBV) de asfaltos convencionais e com composto madeira/borracha.

5.3 ESTABILIDADE E FLUÊNCIA

A estabilidade mede a resistência ao cisalhamento de amostras asfálticas pré-moldadas em laboratório, influenciada pelo intertravamento, atrito e coesão das partículas, ou seja, a estabilidade da mistura está acondicionada ao esqueleto estrutural formado pelas partículas do agregado. Já a Fluência mede a suscetibilidade de asfaltos a deformação sob a influência de tensões múltiplas e indiretamente à elasticidade da mistura.

Os corpos-de-prova de asfalto convencional e modificado com madeira/borracha foram imersos em banho-maria a 60 ± 1 °C (DNER-ME 043/95) para ensaio de estabilidade e fluência, em seguida testados no laboratório de análises asfálticas da empresa LABENG, em Macapá-AP (Figura 5.4).



Figura 5.9 – Ensaio de estabilidade e fluência em corpo-de-prova de asfalto madeira/borracha.

A Tabela 5.2 apresenta os valores de estabilidade, fluência e sua relação do concreto asfáltico convencional e com incorporação de composto madeira/borracha dos corpos-de-prova moldados com misturas asfálticas no dia da execução da pista experimental e na Figura 5.5 os resultados das propriedades das misturas asfálticas dos corpos-de-prova moldados. Teor de asfalto de 7% em CBUQ convencional e asfalto de 7,5% em CBUQ com madeira/borracha, de acordo com a Tabela 5.1.

Tabela 5.4 - Valores de estabilidade, fluência e relação estabilidade/fluência dos concretos asfálticos convencional e com incorporação de composto madeira/borracha.

Variáveis	Especificação	CBUQ convencional	CBUQ com madeira/borracha
Estabilidade (kN)	> 8,0	16,9	17,99
Fluência (mm)	2,0 a 4,6	3,19	3,24
Rel Est/Fluência (MN/m)	--	5,30	5,55

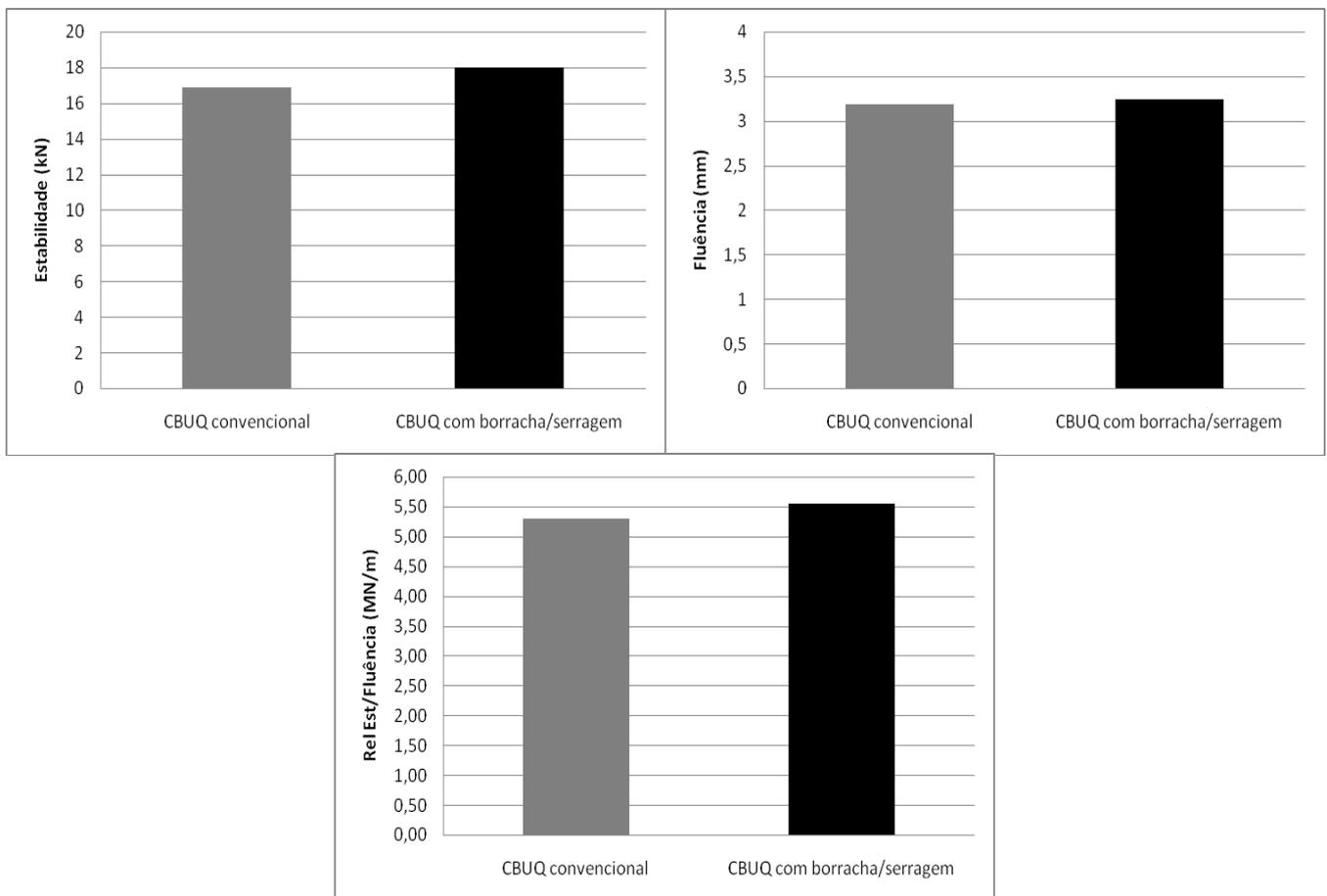


Figura 5.10 - Gráfico de estabilidade, fluência e relação estabilidade/fluência de asfaltos convencionais e com a incorporação de composto madeira/borracha.

O equilíbrio dos valores de estabilidade e fluência como o aumento dos valores de estabilidade, são comportamentos aguardados com o aumento de teor das partículas de borracha. O acréscimo de borracha substitui parte dos agregados minerais aumentando a resistência do esqueleto mineral.

CAPITULO 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo será discutido Módulo de resiliência, resistência à tração e resistência a tração por compressão diametral de corpos-de-prova convencionais e moldados em campo. Será colocado em pauta os resultados de pista experimental após 50 meses de usos do pavimento em estudo

6.1 MÓDULO DE RESILIÊNCIA E RESISTÊNCIA A TRAÇÃO

A Tabela 6.1, apresenta os valores de Módulo de Resiliência (M_r), Resistência à Tração (R_t) à 25 °C, a Relação do Módulo de Resiliência, Resistência à Tração (M_r/R_t) do concreto asfáltico convencional e com incorporação de madeira/borracha dos corpos-de-prova moldados, no dia da execução da pista experimental. Teor de asfalto de 7% em CBUQ convencional e asfalto de 7,5% em CBUQ com madeira/borracha.

Tabela 6.2 - Módulos de Resiliência, Resistência à Tração e Relação Módulo de Resiliência e Resistência à Tração dos corpos-de-prova moldados.

Variáveis	CBUQ convencional		CBUQ com madeira/borracha	
	Projeto	Moldado	Projeto	Moldado
M_r (MPa)	8325,67	5674,34	6345,89	4562,45
R_t (MPa)	1,26	1,45	1,23	1,17
M_r/R_t	6607,67	3913,34	5159,26	3899,53

A Figura 6.1 mostra o gráfico de Módulo de Resiliência (M_r) e a Relação de Módulo de Resiliência e Resistência à Tração ($Rel\ M_r/R_t$) e a Figura 6.2 apresenta os valores da Resistência à Tração (R_t).

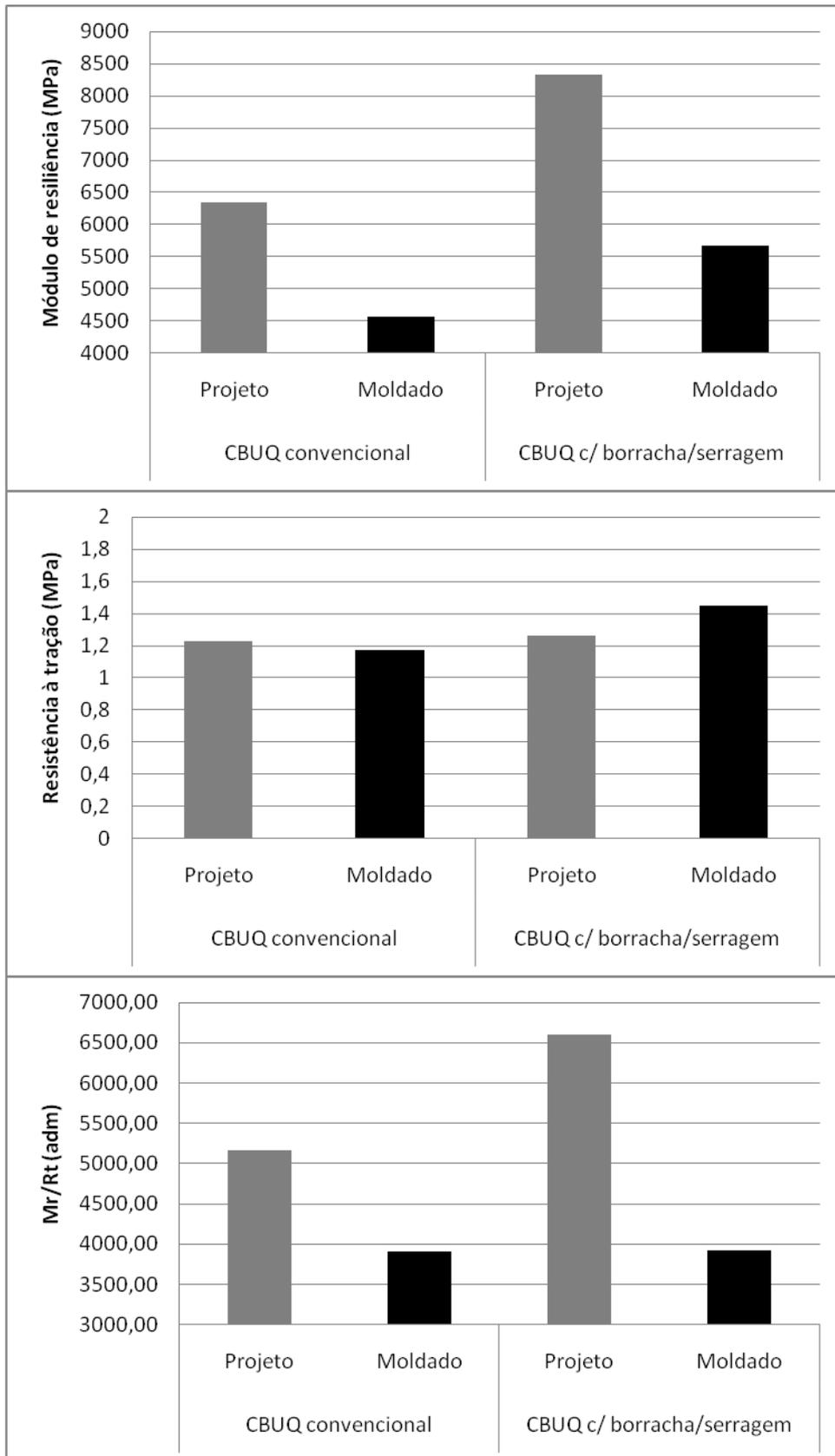


Figura 6.3 - Módulo de resiliência e relação de módulo de resiliência e resistência à tração.

Os resultados expostos na figura 32, tem-se os resultados de Mr e Mr/Rt na qual houve diferença significativa de valores quanto ao que foi experimentado em laboratório (projeto) e o moldado “in loco”. Os valores de projeto são maiores que os moldados, isso se deve ao tempo necessário durante o transporte do material asfáltico, ocorrendo maior tempo para cura do asfalto dentro do caminhão basculante (PAIS *et al.*, 2019), logo o enrijecimento da massa asfáltica e aumento do volume de vazios durante o transporte. A inserção dos materiais compostos em estudo reduziu os valores de Mr e Mr/Rt pois, a borracha assim como o resíduo de madeira dura do composto em estudo, favoreceram o aumento dos vazios da amostra moldada “in loco”.

6.2 RESISTÊNCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Foram feitas os testes de resistência à tração de corpos-de-prova de asfalto sem e com compósito madeira/borracha, de projeto feito em laboratório e extraídos “in loco” durante a pavimentação asfáltica (Figura 6.2).

A resistência à tração dos asfaltos com borracha e resíduo de madeira dura foram maiores devido à maior passagem, do rolo pneumático na faixa de rolamento modificada, compactação em campo.

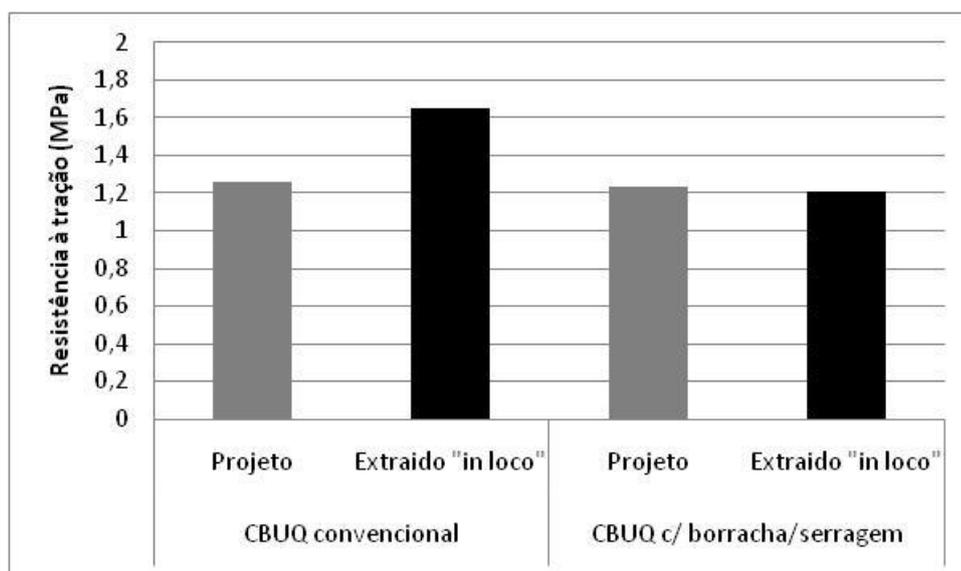


Figura 6.4 - Resistência à tração (25°C).

Houve a necessidade de uma melhor acomodação do composto CBUQ com madeira/Borracha, demandando também maior espessura de camada asfáltica durante a

calibração da vibroacabadora, na qual passou de 7 para 9 cm, atingindo assim um asfalto de 5 cm pós compactação. Os corpos de prova de CBUQ modificados e moldados, tiveram melhores resultados, isso se deve a disposição das partículas de borracha e madeira na mistura asfáltica, na qual houve um ganho no contato composto (borracha e resíduo de madeira dura) e matriz asfáltica.

Aos 50 meses após a aplicação de asfalto convencional e com madeira/borracha, houve uma diferença de estabilidade Marshall nos corpos-de-prova após extração, na qual o asfalto convencional obteve-se 8,48 kN e o asfalto modificado com borracha e resíduo de madeira dura de 10,43 kN (ANEXOS IV e V). Ambos de acordo com a norma DNIT 031/2006-ES onde a estabilidade mínima é de 500 g/cm³.

CAPITULO 7 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões do estudo, em seguida é feita uma reflexão sobre os objetivos do trabalho.

7.1 CONCLUSÕES

De acordo com uma análise reológica, o ganho de resistência ao fluxo versus baixa taxa de cisalhamento ocorreu quando maiores porcentagens de peso de madeira/borracha foram misturadas com o aglutinante, bem como, maiores porcentagens de madeira/borracha, aumentam a rigidez de materiais gerando maior vínculo dos agregados em matriz asfáltica.

De acordo com as comparações entre as misturas de madeira/borracha, os valores de resistência ao escoamento são maiores em misturas que incluem a maior porcentagem de CAP 50/70. A dosagem em que a melhor resposta foi obtida foi entre 8% de ligante asfáltico e 6% de madeira/borracha em peso.

As amostras com 8% de ligante asfáltico e 2% em peso de madeira/borracha são as que possuíram maior estabilidade devido à alta porcentagem de CAP 50/70 e pequena porcentagem de madeira na mistura do composto de madeira/borracha, que diminuiu os vazios resultando no maior envolvimento dos agregados na matriz asfáltica.

A incorporação de madeira/borracha causa o aumento no consumo de ligante, aumento da massa específica, aumento da estabilidade e aumento da fluência.

O projeto de mistura asfáltica com incorporação do composto madeira/borracha para este estudo possui volume de vazios igual a 3,7%, neste caso, segundo estudos feitos em campo, obteve-se um acréscimo do volume de vazios, e um decréscimo na relação betume vazios o que pode comprometer durabilidade do revestimento quanto ao acréscimo de carga e a concentrações de tensões em pontos da massa asfáltica.

O Módulo de resiliência e resistência à tração diminuíram com a incorporação do composto madeira/borracha. O CBUQ convencional, módulo de resiliência de 5674 MPa e resistência a tração de 1,45 MPa moldados *in loco*. O CBUQ com madeira/borracha, modulo de resiliência de 4562 MPa e resistência a tração de 1,17 MPa moldados *in loco*.

A substituição de uma parte dos agregados minerais pelo composto madeira/borracha faz com que a flexibilidade da mistura asfáltica seja aumentada.

Os resultados de Mr/Rt indicam melhoria das propriedades quanto a fadiga a 8% de CAP 50/70 com material modificador (madeira/borracha). Para as misturas asfálticas projetadas, a menor relação Mr/Rt foi obtida na mistura de CBUQ com a madeira/borracha no valor de 5764,09 (adimensional) comparado com CBUQ convencional, no valor de 6930,86 (adimensional), indicando mais flexibilidade na mistura devido um aumento na resistência a tração e redução no módulo de resiliência.

De outro lado, a relação Mr/Rt moldados “in loco”, buscou-se por misturas com capacidade de boa absorção de tensões e apresentar uma boa Rt, a análise feita com os valores de Mr é complexa, depende da estrutura na qual o composto esteja inserido, assim é necessária uma compatibilização entre as camadas quanto à rigidez, cujo o comportamento de desempenho no local da pavimentação será avaliada e monitorada ao longo do tempo. Para o asfalto tipo CBUQ com madeira/borracha, foi encontrado um valor de Mr/Rt de 3899,53 (adimensional) onde a relação Mr/Rt indica a flexibilidade da mistura e que, relações da ordem de 3000 (adimensional) representam misturas flexíveis, mas com boa resistência à tração, permitindo o uso de camadas de CBUQ menos espessas para uma mesma vida de fadiga.

O tamanho dos grãos de composto madeira/borracha devem ser considerados no projeto de mistura asfáltica dada a influência dos fatores quanto a forma da partícula e a superfície do composto, podem alterar diversas propriedades mecânicas e de durabilidade das misturas. Nesta pesquisa o tempo de digestão considerado foi de uma hora, considerando o transporte do composto madeira/borracha em misturas asfálticas e seu transporte da usina móvel até a pavimentação em estudo.

O trecho experimental em estudo têm 50 meses de aplicação. O concreto asfáltico com a incorporação de madeira/borracha pelo processo da via seca não apresentou dificuldades adicionais de quando se executa revestimentos convencionais, conclui-se que o asfalto modificado possui maior estabilidade, 10,43 kN, que o asfalto convencional, 8,48 kN, mesmo após 50 meses da aplicação. A produção da mistura asfáltica do processo via seca é operacionalmente mais simples que o processo via úmida e ainda tem o potencial de consumir maiores quantidades de borracha de pneus, comparado com o processo da via úmida, resultando em um maior benefício ambiental.

Sob o aspecto ambiental, o objetivo principal da incorporação de madeira/borracha em misturas asfálticas está ligado às melhorias mecânicas e funcionais dos materiais de pavimentação. Pesquisas relacionadas à borracha reciclada vêm ganhando espaço e mais que

comprovado, um aditivo aplicável em pavimentação asfáltica na região amazônica, reduzindo a degradação do ambiente em que vivemos.

No geral, a estabilidade Marshall de asfaltos com compósito madeira/borracha foi melhorada, e o mesmo atende todos os requisitos em todas as composições de ligante de 6% a 8,5%. Assim, os resultados apresentados indicam que a inclusão do composto de madeira/borracha de pneu nas misturas asfálticas não compromete seu desempenho, ao contrário, melhoram as propriedades mecânicas, o que torna promissor o seu uso via seca em misturas asfálticas, ou seja, inserido como agregado em asfaltos.

7.2 SUGESTÕES

Fazer um monitoramento da pista em estudo para avaliação do desempenho mecânico e durabilidade deste asfalto com composto madeira/borracha em pista durante 10 anos, tempo mínimo para manutenção de estradas.

Fazer ensaios e possíveis aplicações do composto madeira/borracha diretamente ao ligante, via úmida, e fazer-se constante o uso da sua dosagem para pavimentos rodoviários.

Investigar a influencia da temperatura de mistura dos agregados convencionais, o ligante asfáltico e o composto em estudo, delineando assim uma historiografia de temperaturas na qual melhor pode ser inserido o composto via seca e transportado até o local da obra.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15087/2012:** Misturas asfálticas — Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **DNER-ME 133/94:** Misturas betuminosas – Determinação do módulo de resiliência. Rio de Janeiro, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **DNER-ME 138/94:** Determinação da resistência à tração por compressão diametral de misturas betuminosas. Rio de Janeiro, 1994.
- ADEODATO, S.; MONZONI, M.; BETIOL, L. S.; VILLELA, M. **Madeira de ponta a ponta:** o caminho desde a floresta até o consume. São Paulo, SP: FGV RAE, 2011. p.128.
- AFLAKI, S.; TABATABAEE, N. Proposals for modification of Iranian bitumen to meet the climatic requirements of Iran. **Construction and Building Materials**, v. 23, n° 6, p. 2141–2150, 2009.
- AL-HADIDY, A. I.; TAN, Y. Mechanistic analysis of ST and SBS-modified flexible pavements. **Construction and Building Materials**, v. 23, n° 8, p. 2941–2950, 2009.
- ANGIOSPERMAS. Flora do Brasil 2020 em construção. Jardim Botânico do Rio de Janeiro, [2019]. Disponível em: <<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB128482>>. Acesso em: 24 abr. 2018.
- ARAVIND, K.; DAS, A. Pavement design with central plant hot-mix recycled asphalt mixes. **Construction and Building Materials**, v. 21, p. 928–936, 2007.
- ARSHAD, M.; AHMED, M. F. Potential use of reclaimed asphalt pavement and recycled concrete aggregate in base/subbase layers of flexible pavements. **Construction and Building Materials**, v. 151, p. 83–97, 2017.
- ASSOCIAÇÃO MINEIRA DOS REFORMADORES DE PNEUS (AMIRP). Pneus & Cia, Ano 11, p. 1-36, n. 69. 2019. Disponível em: <http://sindipneus.com.br/wp-content/uploads/2019/05/Revista-Pneus-Cia-69_site.pdf>. Acesso em: 25 out. 2018.
- BASTOS, C. A. B.; SCHMITT, L. A.; DE VASCONCELLOS, S. M.; RABASSA, C. M.; DE SOUZA, E. W. Propriedades geotécnicas de um solo arenoso fino laterítico de barreira litorânea na Planície Costeira Sul do Rio Grande do Sul. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, n° 12, p. 59-67, 2008.
- BERNUCCI, L. B.; DA MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobras; ABEDA, 2008.
- BFG. Growing knowledge: an overview of seed plant diversity in Brazil. **Rodriguésia** 66, 1085-1113, 2015.

BLAISI, N. I. Construction and demolition waste management in Saudi Arabia: Current practice and roadmap for sustainable management. **Journal of Cleaner Production**, v. 221, p. 167-175, 2019.

BOSDOGIANNI, A. **Municipal solid waste management in greece** – legislation – implementation problems. Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium. Sardinia, 2007.

BRIBIÁN, I. Z.; CAPILLA, A. V.; USÓN, A. Aranda. Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. **Building and Environment**, v. 46, n° 5, p. 1133-1140, 2011.

BRYCE, J.; BRODIE, S.; PARRY, T.; LO PRESTI, D. A systematic assessment of road pavement sustainability through a review of rating tools Resources. **Conservation and Recycling**, v. 120, p. 108–118, 2017.

CÁRDENAS, J.; FONSECA, E. Modelación del comportamiento reológico de asfalto convencional y modificado con polímero reciclado, estudiada desde la relación viscosidad-temperatura. **Revista EIA**, n° 12, p. 125-137, 2009.

CHEN, T.; MA, T.; HUANG, X.; GUAN, Y.; ZHANG, Z.; TANG, F. The performance of hot-recycling asphalt binder containing crumb rubber modified asphalt based on physiochemical and rheological measurements. **Construction and Building Materials**, v. 226, p. 83–93, 2019.

CHINDA, T. Examination of Factors Influencing the Successful Implementation of Reverse Logistics in the Construction Industry. **Pilot Study Procedia Engineering**, v. 182, p. 99 – 105, 2017.

CICLOSOFT. Pesquisa Ciclossoft, 2008. Disponível em: <<http://cempre.org.br/ciclossoft/id/5>>. Acessado em: 25 out. 2018.

COELHO, J. G. M.; DE SOUSA, J. G. M.; DIAS, C. G. B. T. Reologia de ligante asfáltico com borracha moída de pneus pós-consumo e arenoso. *In*: RPU – REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 17., 2011, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre, 2011b.

COELHO, J. G. M.; MONTEIRO, L. J. P.; DE SOUSA, J. G. M.; DIAS, C. G. B. T. Asfalto ambientalmente correto: uma nova tendência de mercado. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA – COBENGE, 39., 2011a, João pessoa. **Anais [...]** João Pessoa, 2011a

CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL – CNA. Balanço 2016, perspectives 2017. Tda Brasil, 2017.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução No 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. **D.O.U.**, 17 jul. 2002.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT. **Pesquisa Rodoviária: Relatório Gerencial**. Brasília: Confederação Nacional do Transporte, 2006. Disponível em: <www.cnt.gov.br>. Acesso em: 09 jun. 2016.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT. **Pesquisa Rodoviária: Relatório Gerencial**. Brasília: Confederação Nacional do Transporte, 2013. Disponível em: <www.cnt.gov.br>. Acesso em: 10 jun. 2016.

DENG, X.; LI, Z.; HUANG, Y.; LUAN, Y. Improving mechanism and effect analysis of sulfurated and grafted Eucommia Ulmoides Gum modified rubber asphalt. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 715–722, 2017.

DEUS, R. M.; BATTISTELLE, R. A. G. B.; SILVA, G. H. R. Current and future environmental impact of household solid waste management scenarios for a region of Brazil: carbon dioxide and energy analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 155, p. 218-228, 2017.

DI GIULIO, G. Vantagens ambientais e econômicas no uso de borracha em asfalto. **Revista Conhecimento & Inovação**, p. 12-15, 2010. Disponível em: <<http://inovacao.scielo.br/pdf/inov/v3n3/a08v3n3.pdf>>. Acesso em: 25 out. 2018.

DING, Z.; ZHANG, J.; LI, P.; YUE, X.; BING, H. Analysis of viscous flow properties of styrene–butadiene–styrenemodified asphalt. **Construction and Building Materials**, v. 229, n. 116881, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 043/95: Misturas betuminosas a quente - ensaio Marshall**. Rio de Janeiro, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT 031/2006. Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico – Especificação. Rio de Janeiro, 2006.

FAGUNDES, H. A. V. **Diagnóstico da produção de madeira serrada e geração de resíduos do processamento de madeira de florestas plantadas no rio grande do sul**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do rio Grande do Sul, 2003.

FAKHRI, M.; AMOOSOLTANI, E. The effect of Reclaimed Asphalt Pavement and crumb rubber on mechanical properties of Roller Compacted Concrete Pavement. **Construction and Building Materials**, v. 137, p. 470-484, 2017.

FANG, C.; LI, T.; ZHANG, Z.; WANG, X. Combined Modification of Asphalt by Waste PE and Rubber. **Polymer Composites**, v. 29, n° 9, p. 1183–1187, 2008.

FARINA, A.; ZANETTI, M. C.; SANTAGATA, E.; BLENGINI, G. A. Life cycle assessment applied to bituminous mixtures containing recycled materials: Crumb rubber and reclaimed asphalt pavement. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 117, p. 204–212, 2017.

FAXINA, A. L.; SÓRIA, M. H. A.; FABBRI, G. T. P.; FURLAN, P. A.; LEITE, L. F. M. Propriedades Reológicas Relacionadas à Deformação Permanente de Ligantes Asfálticos Modificados. **Minerva**, n° 5, p. 53-62, 2007.

- FIORE, N.; CARO, S.; D'ANDREA, A.; SCARSELLA, M. Evaluation of bitumen modification with crumb rubber obtained through a high pressure water jet (HPWJ) process. **Construction and Building Materials**, v. 151, p. 682–691, 2017.
- 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.
- GANTER, D.; MIELKE, T.; MAIER, M.; LUPASCU, D.C. Bitumen rheology and the impact of rejuvenators. **Construction and Building Materials**, v. 222, p. 414–423, 2019.
- GIBREIL, H. A. A.; FENG, C. P. Effects of high-density polyethylene and crumb rubber powder as modifiers on properties of hot mix asphalt. **Construction and Building Materials**, v. 142, p. 101–108, 2017.
- GONÇALVES, G. I.; MENDES, G. H. S.; OLIVEIRA, M. G. Enablers and inhibitors of servitisation: a case study in the Brazilian Road transport. *Procedia CIRP*, v. 64, p. 139–144, 2017.
- GÜNTHER, M.; GEIBLER, G.; KÖPPEL, J. Many roads may lead to Rome: Selected features of quality control within environmental assessment systems in the US, NL, CA, and UK. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 62, p. 250–258, 2017.
- GUPTA, A. Building a Green Home Using Local Resources and Sustainable Technology in Jammu Region – A Case Study. **Energy Procedia**, v. 115, p. 59–69, 2017.
- HU, S.; YAN, D.; GUO, S.; CUI, Y.; DONG, B. A survey on energy consumption and energy usage behavior of households and residential building in urban China. **Energy and Buildings**, v. 148, p. 366–378, 2017.
- INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS - IBAMA. **Relatório pneumáticos**: Resolução Conama nº 416/09: 2016 (ano base 2015) / Diretoria de Qualidade Ambiental. Brasília, 2016.
- JUNG, Y.; LIN, W.; HAO, H.; CHO, Y. H. Interface behavior of partial depth repair for airport concrete pavement subjected to differential volume change. **Construction and Building Materials**, v. 143, p. 515–521, 2017.
- KASEER, F.; MARTIN, A. E.; MERCADO, E. A. Use of recycling agents in asphalt mixtures with high recycled materials contents in the United States: A literature review. **Construction and Building Materials**, v. 211, p. 974–987, 2019.
- KEDARISSETTY, S.; BILIGIRI, K. P.; SOUSA, J. B. Advanced rheological characterization of Reacted and Activated Rubber (RAR) modified asphalt binders. **Construction and Building Materials**, v. 122, p. 12–22, 2016.
- KONG, W.; LIU, Z.; YANG, Y.; ZHOU, C.; LEI, J. Preparation and characterizations of asphalt/lauric acid blends phase change materials for potential building materials. **Construction and Building Materials**, v. 152, p. 568–575, 2017.

- KUMAR, A.; SETHY, A.; CHAUHAN, S. Liquefaction behaviour of twelve tropical hardwood species in phenol. **Maderas, Ciencia y tecnologia, ahead of print Epub**, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2018005002501>>. Acesso em: 24 abr. 2018.
- LAM, P. T. I.; YU, A. T. W.; WU, Z.; POON, C. S. Methodology for upstream estimation of construction waste for new building projects. **Journal of Cleaner Production**, v. 230, p. 1003-1012, 2019.
- LEÓN, C.; ROBLES, M. Developing a cadre of professional with a global environmental perspective. **Ocean & Coastal Management**, v. 45, n° 9-10, p. 633–648, 2002.
- LI, P.; DING, Z.; ZOU, P.; SUN, A. Analysis of physico-chemical properties for crumb rubber in process of asphalt modification. **Construction and Building Materials**, v. 138, p. 418–426, 2017.
- LIU, S.; SHUKLA, A.; NANDRA, T. Technological, environmental and economic aspects of Asphalt recycling for road construction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, p. 879–893, 2017.
- LUSTOSA, M. C. J. Inovação e meio ambiente no enfoque evolucionista: o caso das empresa paulistas. In: ENCONTRO NACIONAL DA ANPEC, 27., 1999, Belém. **Anais [...]** Belém, 1999.
- MAHDIKHANI, M.; KHANBAN, M. Utilization of industrial waste residue containing heavy metals as a substitute for fine aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 221, p. 772–786, 2019.
- MAHAYUDDINA, S. A.; ZAHARUDDINA, W. A. Z. W.; HARUNB, S. N.; ISMAIL, B. Assessment of building typology and construction method of traditional longhouse. **Procedia Engineering**, v. 180, p. 1015 – 1023, 2017. Disponível em: <<http://www.sbe16sydney.be.unsw.edu.au/Proceedings/33346.pdf>>. Acesso em: 25 out. 2018.
- MARKIEWICZ, A.; BJÖRKLUND, K.; ERIKSSON, E.; KALMYKOVA, Y.; STRÖMVALL, A. M.; SIOPI, A. Emissions of organic pollutants from traffic and roads: Priority pollutants selection and substance flow analysis. **Science of the Total Environment**, v. 580, p. 1162–1174, 2017.
- MAK, T. M. W.; CHEN, P.; WANG, L.; TSANG, D. C. W.; HSU, S. C. A system dynamics approach to determine construction waste disposal charge in Hong Kong. **Journal of Cleaner Production**, v. 241, n. 118309, 2019.
- MEDINA, J. **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro: UFRJ, 1997.
- MO, L.T.; HUURMAN, M.; WOLDEKIDAN, M. F.; WUB, S. P., MOLENAAR, A. A. A. Investigation into material optimization and development for improved ravelling resistant porous asphalt concrete. **Materials and Design**, v. 31, p. 3194–3206, ago. 2010.

NORIEGA, P.; SANTOS, J.; MIGUEL, S. Perspectiva ambiental de segurança rodoviária. *In: Colóquio Internacional sobre Segurança e Higiene do Trabalho*, 2., 2002. **Anais [...]** p. 117-126, 2002.

OLIVEIRA, V. M.; MARTINS, M. F.; FREITAS, L. S.; CÂNDIDO, G. A. Gestão ambiental e condicionamento de pneus: um estudo de caso na alfa condicionadora de pneus em Campina Grande – PB. *In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO*, 30., 2010, São Carlos – SP. **Anais [...]**, São Carlos – SP, 2010.

PAIS, J.; LO PRESTI, D.; SANTOS, C.; THIVES, L.; PEREIRA, P. The effect of prolonged storage time on asphalt rubber binder properties. **Construction and Building Materials**, v. 210, p. 242–255, 2019.

PAIS, J. C.; THIVES, L. P.; PEREIRÂ, P. A. A.; TRICHÊS, G. Constructing better roads with asphalt rubber. **Romanian Journal of Transport Infrastructure**, v. 4, 2015.

PARK, D. W.; SEO, W. J.; KIM, J.; VO, H. V. Evaluation of moisture susceptibility of asphalt mixture using liquid anti-stripping agents. **Construction and Building Materials**, v. 144, p. 399–405, 2017.

PÊGO, B. **Logística e Transportes no Brasil: Uma Análise do Programa de Investimentos 2013-2017 Em Rodovias e Ferrovias - Relatório de Pesquisa**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA, 2016.

PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; TRUGILHO, P. F.; MELO, I. C. N. A.; OLIVEIRA, A. C. Estudo da degradação térmica da madeira de Eucalyptus através de termogravimetria e calorimetria. **Revista Árvore**, v. 37, n. 3, p. 567-576, 2013.

PLANO DE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL – PGRCC. Comercial – Centro de Distribuição. Várzea Grande – MT, 2014.

PINTO, T. P.; GONZÁLES, J. L. R. **Manejo e gestão dos resíduos da construção civil: Volume 1 – Manual de orientação: como implementar um sistema de manejo e gestão nos municípios**. Brasília: CAIXA, 2005.

PINTO, Tarcísio de Paulo. **Gestão ambiental dos resíduos da construção civil: a experiência do SindusCon-SP**. São Paulo: SindusCon, 2005.

PIOVEZAN JÚNIOR, G. T. A. **Avaliação dos Resíduos da Construção Civil (RCC) Gerados no Município de Santa Maria**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

PIOVEZAN JÚNIOR, G. T. A.; SILVA, C. E. **Investigação dos Resíduos da Construção Civil (RCC) Gerados no Município de Santa Maria-RS: um passo importante para a gestão sustentável**. Belo Horizonte, 2007.

PREFEITURA retira 50 toneladas de pneus das ruas de Macapá. *Diário do Amapá, Cidades*, abr. 2017. Disponível em: <<https://www.diariodoamapa.com.br/cadernos/cidades/prefeitura-retira-50-toneladas-de-pneus-das-ruas-de-macap/>>. Acesso em: 19 mar. 2018.

PRATICÒ, F. G.; ASTOLF, A. A new and simplified approach to assess the pavement surface micro- and macrotecture. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 476–483, 2017.

PSZCZOŁA, M.; JACZEWSKI, M.; SZYDŁOWSKI, C.; JUDYCKI, J.; DOŁŻYCKI, B. Evaluation of Low Temperature Properties of Rubberized Asphalt Mixtures. **Procedia Engineering**, v. 172, p. 897-904, 2017.

RAMAGE, et al. The wood from the trees: The use of timber in construction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, p. 333 – 359, 2017.

RAUBER, A. C. C.; CASSANEGO, M. L.; SILVA, R. F. Diagnóstico de impactos ambientais causado por usina de asfalto. *Disc. Scientia. Série: Ciências Naturais e Tecnológicas*, v. 5, n. 1, p. 97-106, 2004.

REBEHY, P. C. P. W.; COSTA, A. L.; CAMPELLO, C. A. G. B.; ESPINOZA, D. F.; NETO, M. J. Innovative social business of selective waste collection in Brazil: Cleaner production and poverty reduction. **Journal of Cleaner Production**, v. 154, p. 462-473, 2017.

RODRIGUES, F. O.; SOARES, J. B.; SOARES, S. A. Efeito do líquido da castanha do caju (LCC) nas propriedades reológicas do ligante asfáltico modificado por sbs. *Dissertação, Universidade Federal do Ceará*, 2010.

ROSSI, C. O.; CAPUTO, P.; BALDINO, N.; SZERB, E. I.; TELTAYEV, B. Quantitative evaluation of organosilane-based adhesion promoter effect on bitumen-aggregate bond by contact angle test International. **Journal of Adhesion & Adhesives**, v. 72, p. 117–122, 2017.

SAGBANSUA, L.; BALO, F. A novel simulation model for development of renewable materials with waste-natural substance in sustainable buildings. **Journal of Cleaner Production**, v. 158, p. 245-260, 2017.

SALAZAR, R. A. R.; RIVERA, J. F.; DE GUTIÉRREZ, R. M. Alkali-activated building materials made with recycled construction and demolition wastes. **Construction and Building Materials**, v. 149, p. 130–138, 2017.

SANTERO, N. J.; HARVEY, J.; HORVATH, A. Environmental policy for long-life pavements. *Transportation Research Part D*, v. 16, n° 2, p. 129–136, 2011.

SEMENYCHEV, V. K.; KURKIN, E. I.; SEMENYCHEV, E. V.; DANILOVA, A. A. Multimodel forecasting of non-renewable resources production. **Energy**, v. 130, p. 448-460, 2017.

SENGOZ, B.; ISIKYAKAR, G. Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 1897–19, 2008.

SHAH, R.; MCMANN, O.; BORTHWICK, F. Challenges and prospects of applying asset management principles to highway maintenance: A case study of the UK. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 97, p. 231-243, 2017.

SHIH, H.; MA, H. Assessing the health risk of reuse of bottom ash in road paving. **Chemosphere**, n° 82, n° 11, p. 1556–1562, 2011.

SIENKIEWICZ, M.; JANIK, H.; LABUDA, K. B.; LIPKA, J. K. Environmentally friendly polymer-rubber composites obtained from waste tyres: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 147, p. 560-571, 2017.

SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K. Use of recycled aggregates arising from construction and demolition waste in new construction applications. *Journal of Cleaner Production*, v. 236, p. 117629, 2019.

SILVA, A. F.; DE FIGUEIREDO, C. F. Reaproveitamento de Resíduos de MDF da Indústria Moveleira. **Design & Tecnologia**, v. 02, 2010.

SORMUNEN, P.; KÄRKI, T. Recycled construction and demolition waste as a possible source of materials for composite manufacturing. **Journal of Building Engineering**, v. 24, n. 100742, 2019.

SOUZA, M. L. **Métodos de projeto de pavimentos flexíveis**. 3. ed. Rio de Janeiro: Instituto de pesquisas rodoviárias – IPR, 1981.

SOUZA, U. E. L.; PALIARI, J. C.; AGOPYAN, V.; ANDRADE, A. C. Diagnóstico e combate à geração de resíduos na produção de obras de construção de edifícios: uma abordagem progressiva. **Ambiente construído**, v. 04, n° 4, p. 33-46, 2004.

STUERMER, M. Industrialization and the demand for mineral commodities. **Journal of International Money and Finance**, v. 76, p. 16–27, 2017.

TAPKIN, S.; ÇEVIK, A.; UŞAR, Ü. Prediction of Marshall test results for polypropylene modified dense bituminous mixtures using neural networks. **Expert Systems with Applications**, v. 37, n° 6, p. 4660–4670, 2010.

TAVARES, L.; ANDRADE, M.; MAIA, M. L. Urban impacts due to barrier effect caused by Road duplication: The case of Goianinha/RN in Brazil. **Transportation Research Procedia**, v. 25, p. 4637–4648, 2017.

THIVES, L. P.; PAIS, J. C.; PEREIRA, P. A. A.; TRICHÊS, G.; AMORIM, S. R. Assessment of the digestion time of asphalt rubber binder based on microscopy analysis. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 431–440, 2013.

THODESEN, C.; SHATANAWI, K.; AMIRKHANIAN, S. Effect of crumb rubber characteristics on crumb rubber modified (CRM) binder viscosity. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 295–303, n° 01, nov. 2007/jan. 2008.

THODESEN, C.; XIAO, F.; AMIRKHANIAN, S. N. Modeling viscosity behavior of crumb rubber modified binders. *Construction and Building Materials*, v. 23, n° 9, p. 3053–3062, 2009.

VIOLA, S. Green roofs for built environment recovery: technological transitions. **Journal of Cleaner Production**, v. 153, p. 592-599, 2017.

VITORINO, K. M. N.; CORREIA, J. C. D. A.; XAVIER, L. H.; FREIRE, N. Logística reversa e responsabilidade pós-consumo nas leis estaduais brasileiras para resíduos sólidos. *In*: SIMPOSIO IBEROAMERICANO DE INGENIERÍA DE RESIDUOS, 3.; SEMINÁRIO DA REGIÃO NORDESTE SOBRE RESÍDUOS SÓLIDOS, 2., 2010, João Pessoa. **Anais [...]** João Pessoa, 2010.

WALLQVIST, V.; KJELL, G.; CUPINAA, E.; KRAFT, L.; DECKE, C.; WILLINGER, R. New functional pavements for pedestrians and cyclists. **Accident Analysis and Prevention**, v. 105, p. 52–63, 2017.

WANG, Y.; CHONG, D.; WEN, Y. Quality verification of polymer-modified asphalt binder used in hot-mix asphalt pavement construction. **Construction and Building Materials**, v. 150, p. 157–166, 2017.

WANG, J.; YU, B.; TAM, V. W. Y.; LI, J.; XU, X. Critical factors affecting willingness of design units towards construction waste minimization: An empirical study in Shenzhen, China. **Journal of Cleaner Production**, v. 221, p. 526-535, 2019a.

WANG, J.; WU, H.; TAM, V.W.Y.; ZUO, J. Considering life-cycle environmental impacts and society's willingness for optimizing construction and demolition waste management fee: An empirical study of China. **Journal of Cleaner Production**, v. 206, p. 1004-1014, 2019b.

YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; LEE, D. H.; ZHENG, C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, v. 87, p. 1781–1788, 2007.

YANG, J. M.; SHIN, H. O; YOO, D. Y. Benefits of using amorphous metallic fibers in concrete pavement for long-term performance. **Archives of civil and mechanical engineering**, v. 17, p. 750–760, 2017.

ANEXO I – Perfis de sondagem a trado

Cliente: ETECOM LTDA.				Furo: ST01
Local da Sondagem: Rodovia Juscelino Kubitscheck, Km 05				Cota: 100,00 (RN)
Sondador: Carlos		Data: início: término:		Relatório: RS12/01
(m)	Cota em Relação ao RN	Amostra	Profun- didade da Camada	Descrição dos Horizontes de Solo
				Classificação do Material
1	99,80	1	0,20	Solo Orgânico
	99,30	2	0,55	Argila Siltosa Vermelha Escura
2	96,30	3	1,05	
3				
4				Areia Siltosa
5				
6				3,70
7				
8				
Verificação: ETECON - Laboratório de Geotecnia				Prof. do NA: Sem NA

Cliente: ETECOM LTDA.				Furo: ST02
Local da Sondagem: Rodovia Juscelino Kubitscheck, Km 05				Cota: 100,00 (RN)
Sondador: Carlos		Data: início: término:		Relatório: RS12/01

(m)	Cota em Relação ao RN	Amostra	Profun- didade da Camada	Descrição dos Horizontes de Solo
				Classificação do Material
	99,80	1	0,20	Solo Orgânico
1	99,30	2	0,65	
2		3		Argila Siltosa Vermelha Escura
3				Argila Siltosa Vermelha (Solo Residual Jovem - Saprolítico)
4	96,30		1,15	Areia Siltosa
5				
6			3,25	
7				
8				

Verificação: ETECON - Laboratório de Geotecnia

Prof. do NA: Sem NA

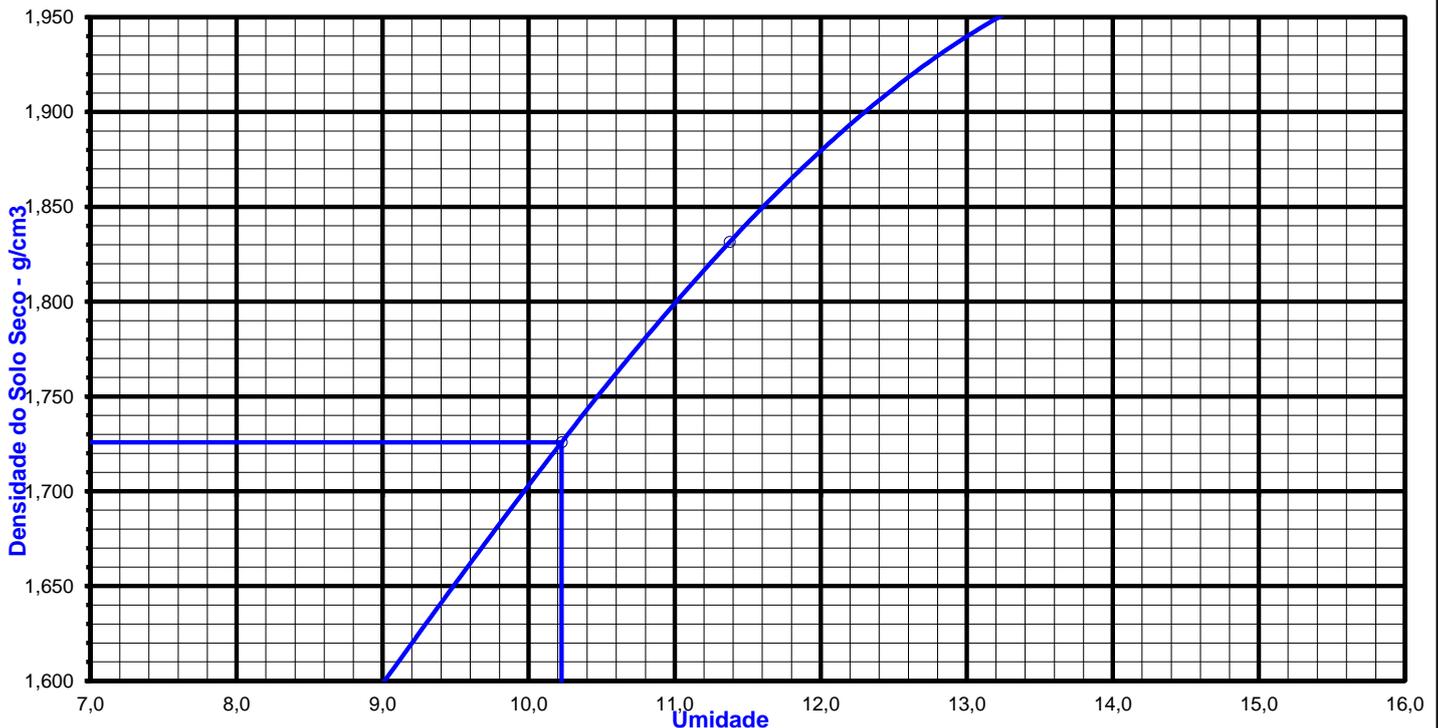
ANEXO II – Compactação e CBR do Subleito

LABORATÓRIO DE SOLOS, ASFÁLTO E CONCRETO
ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

OBRA BR-101		TRECHO KM-05			OBSERVAÇÃO FURO - 08	
PROCEDÊNCIA	ESTACA	LADO E-X-D D	PROFUND. EM Cm	REGISTRO Nº		
CAMADA: 6	OPERADOR SILVA	EST. COLETA	DATA 06/05/01	CALCULISTA FERNANDO	VISTO	
UMIDADE HIGROSCOPIA	%	%	MOLDE Nº	13	DENSIDADE MÁXIMA:	
Cápsula - Nº		47	VOLUME DO MOLDE	2058	1,726 g/cm ³	
Peso Bruto Úmido		90,21	PESO DO MOLDE	5034		
Peso Bruto Seco		89,33	PESO DO SOQUETE	4533	UMIDADE ÓTIMA: 10,23 %	
Peso da Cápsula		29,89	ESPESSURA DO DISCO ESPAÇADOR	2 1/2"		
Peso da Água		0,88	GOLPES / CAMADA	12		
Peso do Solo Seco		59,44	Nº DE CAMADAS	05		
Umidade (%)		1,48				
Umidade Média	1,48					

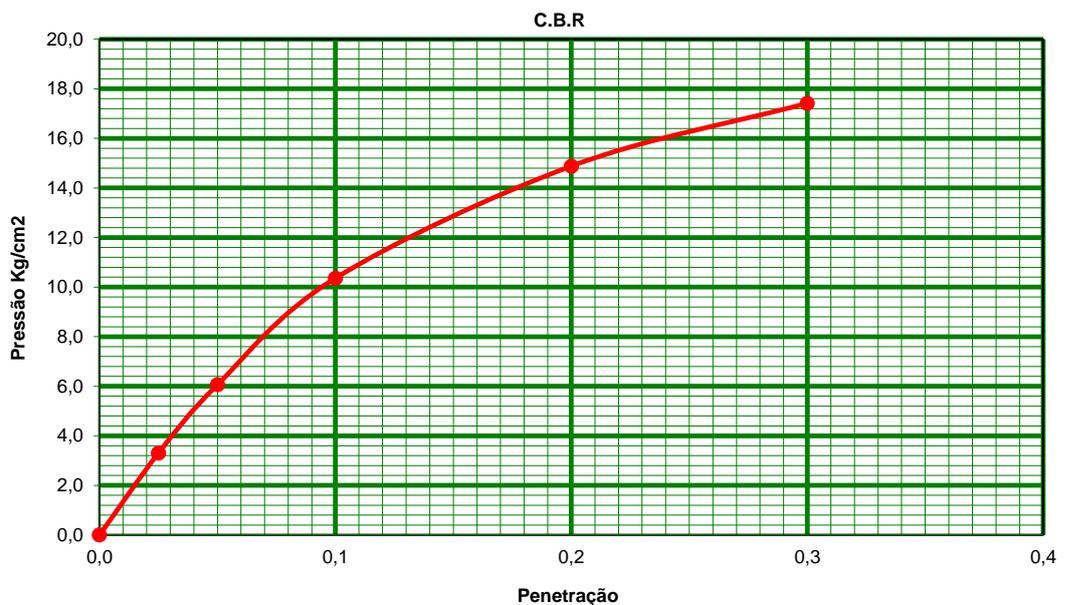
PONTONº	PESO BRUTO ÚMIDO	PESO SOLO ÚMIDO	DENSIDADE SOLO ÚMIDO	DETERMINAÇÃO DA UMIDADE							UMIDADE MÉDIA %	DENSIDADE DO SOLO SECO %
				CÁPSULA Nº	PESO BRUTO ÚMIDO	PESO BRUTO SECO	PESO DA CÁPSULA	PESO DA ÁGUA	PESO SOLO SECO	UMIDADE %		
1	8545	3511	1,706	43	88,45	87,34	17,03	1,11	70,31		1,6	1,680
2	8949	3915	1,902	25	75,22	69,96	18,52	5,26	51,44		10,2	1,726
3	9328	4294	2,086	77	72,12	62,56	17,64	9,56	44,92		21,3	1,720
4	9361	4327	2,103	39	89,37	78,33	30,61	11,04	47,72		23,1	1,707
5	9232	4198	2,040	86	84,35	77,45	16,80	6,90	60,65		11,4	1,831

Compactação



C.B.R.

RODOVIA: Juscelino Kubitschek		TRECHO:			SUB-TRECHO							
PROCED. SAIB. SUB-LEIT		LOCAL / FURO / ESTACA: FURO - 8		LADO E-X-D	PROFUND. EM Cm:	REGISTRO Nº						
SUBLEITO		OPERADOR: MENDES		DATA: 03/06/2001	CALCULISTA: CLOVIS	VISTO:						
UMIDADE		Higroscópica		De Moldagem		Molde Nº						
Cápsula - Nº		29		03		Peso do Molde						
Peso Bruto Úmido		75,40		57,65		Volume do Molde						
Peso Bruto Seco		73,24		55,23		Nº de Camadas						
Peso da Cápsula		16,89		10,76		Golpes/Camada						
Peso da Água		2,16		2,42		Peso do Soquete						
Peso do Solo Seco		56,35		44,47		Espessura do disco Espaçador						
Umidade (%)		3,83		5,4		Altura do Cilindro (mm)						
Umidade Média (%)		3,83		5,4								
DADOS DE COMPACTAÇÃO				CÁLCULO DA ÁGUA								
Densidade Máxima - Kg/m ³		1,726		Peso do Solo		Anel Din.						
Umidade ótima - %		10,2		Passando na # Nº 4		Nº 1						
Umidade Higroscópica - %		3,8		Peso de Pedregulho Retido na # Nº 4		Constante						
Diferença de Umidade - %		6,4		Água a Juntar		k= 0,110226						
ENSAIO DE PENETRAÇÃO						Expansão						
Tempo min.	Penetração		Leitura Extens.	Pressão - Kg/cm ²				Datas		Leitura Defl. mm	Difer. mm	Exp. mm
	Pol	mm		Determ.	Corrigido	Padrão	%	Dia	Hora			
30 seg	0,025	0,63	30	3,3				4-jun		1,00	0,00	0,000
1	0,05	1,27	55	6,1				5-jun		1,01	0,01	0,009
2	0,1	2,54	94	10,4	10,4	70	14,8	6-jun		1,02	0,02	0,017
4	0,2	5,08	135	14,9	14,9	105	14,2	7-jun		1,03	0,03	0,026
6	0,3	7,62	158	17,4		133						
8	0,4	10,16	210			161						
10	0,5	12,7	278			182						
Moldagem de Verificação		CBR 14,80%										
Peso Bruto Úmido												
9.425												
Peso Úmido												
4.506												
Densidade Úmida												
2,154												
Densidade Seca												
2,043												
Grau de Compactação												
118,4%												
Obs:												

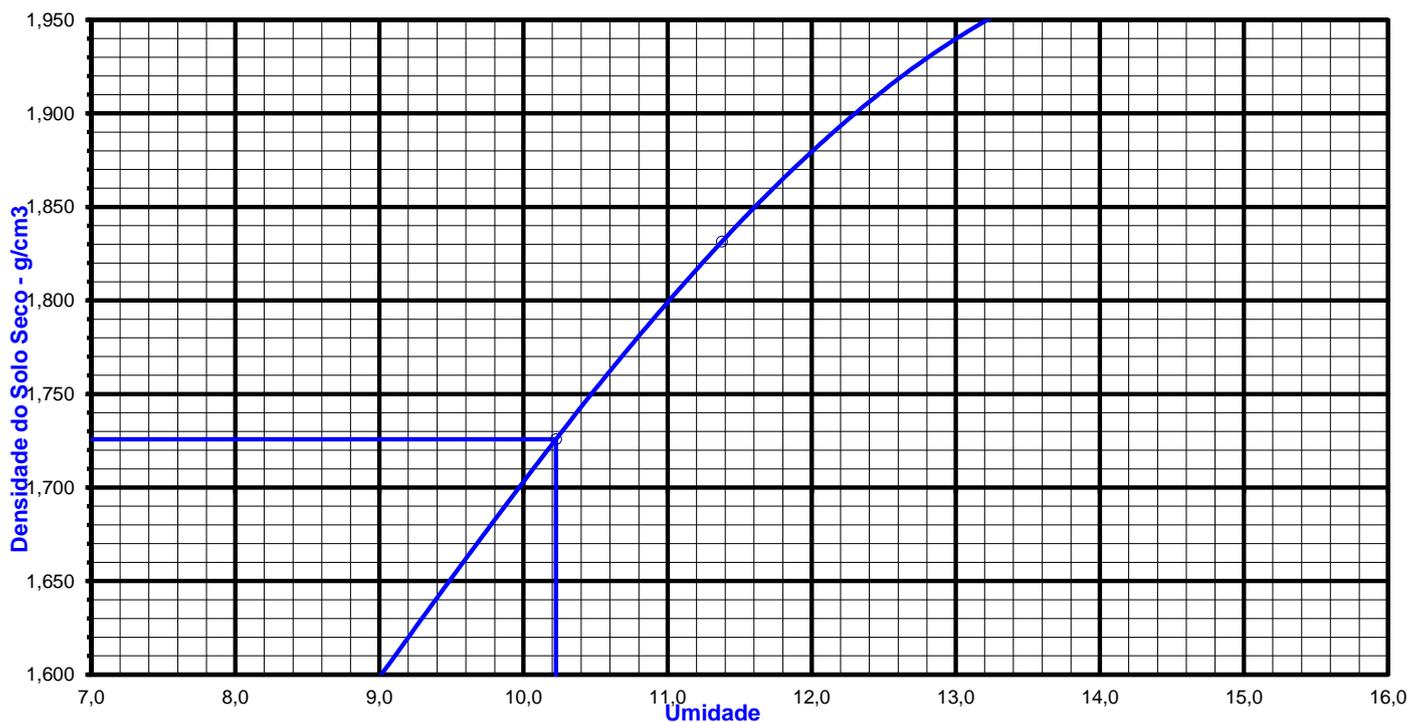


LABORATÓRIO DE SOLOS, ASFÁLTO E CONCRETO
ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

OBRA BR-101		TRECHO KM-05			OBSERVAÇÃO FURO - 09		
PROCEDÊNCIA		ESTACA		LADO E-X-D D		PROFUND. EM Cm	REGISTRO Nº
CAMADA: 8	OPERADOR SILVA	EST. COLETA		DATA 15/05/01	CALCULISTA FERNANDO		VISTO
UMIDADE HIGROSCOPIA	%	%	MOLDE Nº			DENSIDADE MÁXIMA:	
Cápsula - Nº		55	VOLUME DO MOLDE	18		1,765 g/cm ³	
Peso Bruto Úmido		91,12	PESO DO MOLDE	2056			
Peso Bruto Seco		90,34	PESO DO SOQUETE	4531			
Peso da Cápsula		29,55	ESPESSURA DO DISCO ESPAÇADOR	2 1/2"		UMIDADE ÓTIMA:	
Peso da Água		0,78	GOLPES / CAMADA	12		19,71 %	
Peso do Solo Seco		60,79	Nº DE CAMADAS	05			
Umidade (%)		1,28					
Umidade Média	1,28						

PONTO Nº	PESO BRUTO ÚMIDO	PESO SOLO ÚMIDO	DENSIDADE SOLO ÚMIDO	DETERMINAÇÃO DA UMIDADE						UMIDADE MÉDIA %	DENSIDADE DO SOLO SECO %
				CÁPSULA Nº	PESO BRUTO ÚMIDO	PESO BRUTO SECO	PESO DA CÁPSULA	PESO DA ÁGUA	PESO SOLO SECO		
1	8432	3408	1,658	55	88,32	86,98	16,45	1,34	70,53	1,9	1,627
2	8834	3810	1,853	34	71,22	68,45	12,45	2,77	56,00	4,9	1,766
3	9234	4210	2,048	22	71,22	63,26	17,56	7,96	45,70	17,4	1,744
4	9291	4267	2,075	21	90,34	79,45	31,33	10,89	48,12	22,6	1,692
5	9124	4100	1,994	67	85,85	76,45	17,31	9,40	59,14	15,9	1,721

Compactação



C.B.R.

RODOVIA: Juscelino Kubitschek	TRECHO:	SUB-TRECHO		
PROCED. SAIB. SUB-LEIT	LOCAL / FURO / ESTACA: FURO - 9	LADO E-X-D	PROFUND. EM Cm:	REGISTRO Nº
SUBLEITO	OPERADOR: MENDES	DATA: 21/06/2001	CALCULISTA: CLOVIS	VISTO:

UMIDADE	Higroscópica		De Moldagem		Molde Nº	
Cápsula - Nº	45		06		Peso do Molde	18
Peso Bruto Úmido	75,21		55,35		Volume do Molde	4923
Peso Bruto Seco	73,98		54,32		Nº de Camadas	2085
Peso da Cápsula	17,42		10,33		Golpes/Camada	05
Peso da Água	1,23		1,03		Peso do Soquete	12
Peso do Solo Seco	56,56		43,99		Espessura do disco Espaçador	4536
Umidade (%)	2,17		2,3		Altura do Cilindro (mm)	2 1/2"
Umidade Média (%)	2,17		2,3			114,5

DADOS DE COMPACTAÇÃO		CÁLCULO DA ÁGUA			Anel Din.
Densidade Máxima - Kg/m ³	1,765	Peso do Solo Passando na # Nº 4		Úmido	6000
Umidade ótima - %	19,7	Peso de Pedregulho Retido na # Nº 4		Seco	5872
Umidade Higroscópica - %	2,2	Água a Juntar			1030
Diferença de Umidade - %	17,5				Constante k= 0,077092

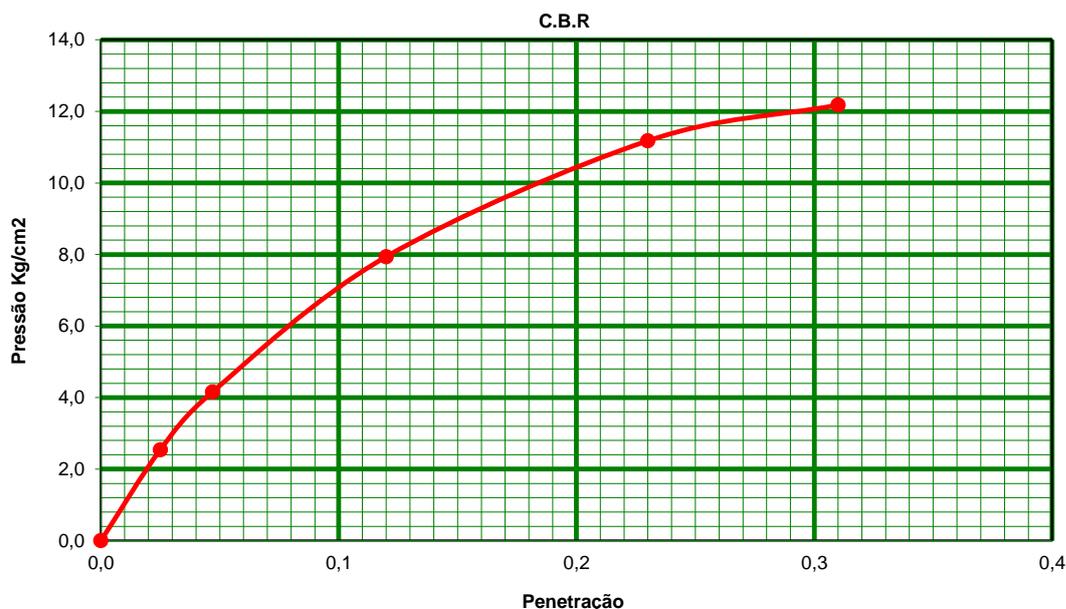
ENSAIO DE PENETRAÇÃO								Expansão				
Tempo min.	Penetração		Leitura Extens.	Pressão - Kg/cm ²				Datas		Leitura Defl.mm	Difer. mm	Exp. mm
	Pol	mm		Determ.	Corrigido	Padrão	%	Dia	Hora			
30 seg	0,025	0,55	33	2,5				22-jun		1,09	0,09	0,079
1	0,047	1,33	54	4,2				23-jun		1,11	0,11	0,096
2	0,12	2,67	103	7,9	7,9	70	11,3					
4	0,23	4,89	145	11,2	11,2	105	10,6	24-jun		1,06	0,06	0,052
6	0,31	6,33	158	12,2		133						
8	0,45	11,45	205			161		25-jun		1,07	0,07	0,061
10	0,52	11,58	266			182						

Moldagem de Verificação

CBR 11,34%

Peso Bruto Úmido	9.645
Peso Úmido	4.722
Densidade Úmida	2,265
Densidade Seca	2,213
Grau de Compactação	125,4%

Obs:



ANEXO III – Limite de liquidez e plasticidade

LIMITE DE LIQUIDEZ								
Cápsula	N.º	25	48	21	93	98	Operador:	PAULO
Golpes	g	10	20	29	40	48		
Peso Bruto Úmido	g	16,35	19,87	12,81	17,80	18,15	Data:	29/05/2004
Peso Bruto Seco	g	14,84	17,93	11,15	16,38	17,01		
Peso da Cápsula	g	9,59	10,62	5,34	10,66	11,90	Calculista:	CARLOS
Peso da Água	g	1,51	1,94	1,66	1,42	1,14		
Peso do Solo Seco	g	5,25	7,31	5,81	5,72	5,11		FURO 1
Umidade	%	28,8	26,5	28,6	24,8	22,3		

LIMITE DE PLASTICIDADE								
Cápsula	N.º	39	24	11	8	3	LL	26,3
Peso Bruto Úmido	g	13,37	12,94	14,27	13,65	14,02		
Peso Bruto Seco	g	12,99	12,65	13,95	13,41	13,72	LP	16,4
Peso da Cápsula	g	10,22	10,92	12,05	12,03	11,96		
Peso da Água	g	0,38	0,29	0,32	0,24	0,30	OBS: IP :	9,9
Peso do Solo Seco	g	2,77	1,73	1,90	1,38	1,76		
Umidade	%	13,7	16,8	16,8	17,4	17,1		
		Abandona	OK	OK	Abandona	OK		

LIMITE DE LIQUIDEZ $y = -3,38\ln(x) + 37,17$



LIMITE DE LIQUIDEZ							
Cápsula	N.º	25	48	21	93	98	Operador: PAULO
Golpes	g	10	20	29	40	48	
Peso Bruto Úmido	g	17,35	20,87	16,81	18,80	18,95	Data: 29/05/2004
Peso Bruto Seco	g	15,84	18,53	15,15	16,48	16,63	
Peso da Cápsula	g	9,39	8,62	8,34	7,36	7,41	Calculista: CARLOS
Peso da Água	g	1,51	2,34	1,66	2,32	2,32	
Peso do Solo Seco	g	6,45	9,91	6,81	9,12	9,22	FURO 2
Umidade	%	23,4	23,6	24,4	25,4	25,2	

LIMITE DE PLASTICIDADE							
Cápsula	N.º	39	24	11	8	3	LL 24,2
Peso Bruto Úmido	g	13,37	12,94	14,27	13,65	14,02	
Peso Bruto Seco	g	12,99	12,65	13,92	13,41	13,72	LP 16,2
Peso da Cápsula	g	10,72	10,92	11,75	12,13	11,34	
Peso da Água	g	0,38	0,29	0,35	0,24	0,30	OBS: IP : 8,0
Peso do Solo Seco	g	2,27	1,73	2,17	1,28	2,38	
Umidade	%	16,7	16,8	16,1	18,8	12,6	
		OK	OK	OK	Abandona	Abandona	

LIMITE DE LIQUIDEZ $y = 0,056x + 22,75$



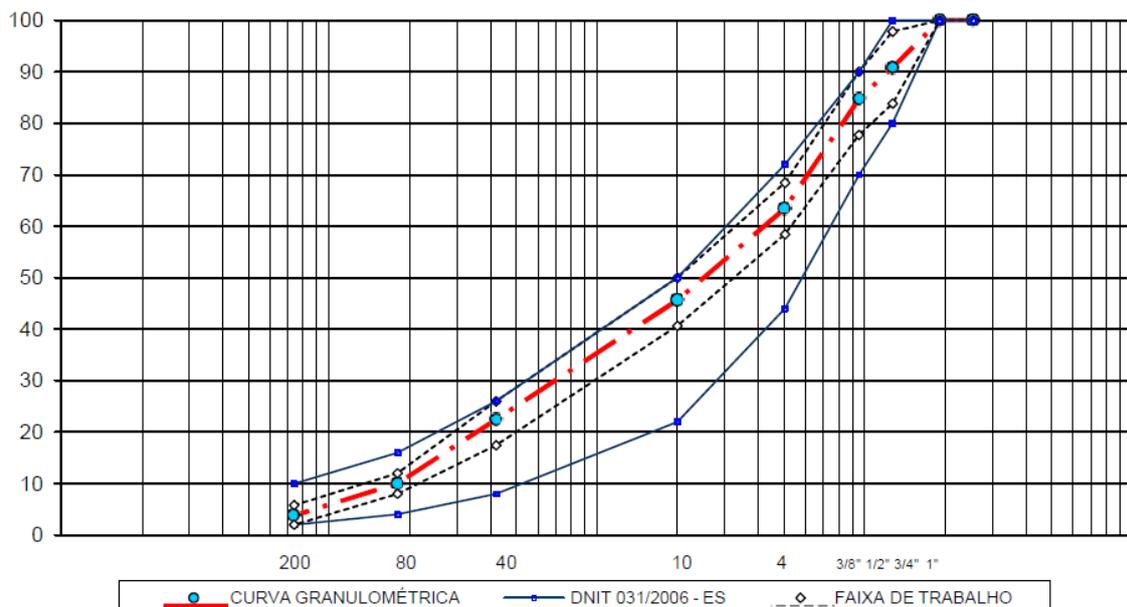
ANEXO IV – Traço de C.B.U.Q. Convencional e Extração em
pista



CONTROLE DE CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE

OBRA : Usina do Setrap	TRECHO: com brita 1"	Data: 21/05/2018	REG. 002
EMPRESA: GEA	APLICAÇÃO: CBUQ. Fixa - C - DNIT	ENSAIO: Extração de pista com borracha	

ENSAIO MARSHALL					EXTRAÇÃO DE BETUME				
C.P. Nº	01	02	03	MÉDIA	TARA		01		
PESO AO AR	1.115,7				AMOSTRA + TARA				
P. IMERSO	614,6				AMOSTRA		515,28		
P. CESTO IMERSO	-		-		INSOLÚVEL		482,65		
VOLUME cm ³	508,4				SOLÚVEL		32,63		
DENS. APARENTE	2,223			2,223	TEOR DE BETUME (%)		5,36		
DENS. TEÓRICA	2,478				GRANULOMETRIA				
% VAZIOS	9,5			9,5	PENEIRAS		PESO	PESO	%
% V.C.B.	10,45				POL.	mm.	RETIDO	PASSANDO	PASSANDO
% V.A.M.	20,56				2"	50,800			
% R.B.V.	52,8			52,8	1 1/2"	38,100			
LEIT. DEFLECT.	628				1"	25,400		492,5	100,0
EST. ENCONTRADA	1425				3/4"	19,100		492,5	100,0
FATOR CORREÇÃO	1,08				1/2"	12,700	45,7	447,3	91,1
EST. CORRIGIDA	1650			1650	3/8"	9,520	30,4	417,3	84,3
FLUÊNCIA (mm)	2,68			2,68	Nº 4	4,760	104,7	313,7	63,1
TEMPERATURAS °C					Nº 10	2,000	86,1	224,8	44,9
TEMPERATURA DA MOLDAGEM:					Nº 40	0,420	113,8	111,3	22,2
TEMPERATURA DA MASSA:					Nº 80	0,180	61,4	49,1	9,7
TEMPERATURA DO LIGANTE :					Nº 200	0,074	30,1	18,7	3,6
F.C. DO ANEL:				1.32016	FUNDO		18,8		



RESPONSÁVEL PELO LABORATÓRIO :

LABORATÓRIO DE ENGENHARIA LTDA.
Francisco Alves de Brito
 Laboratorista-AP

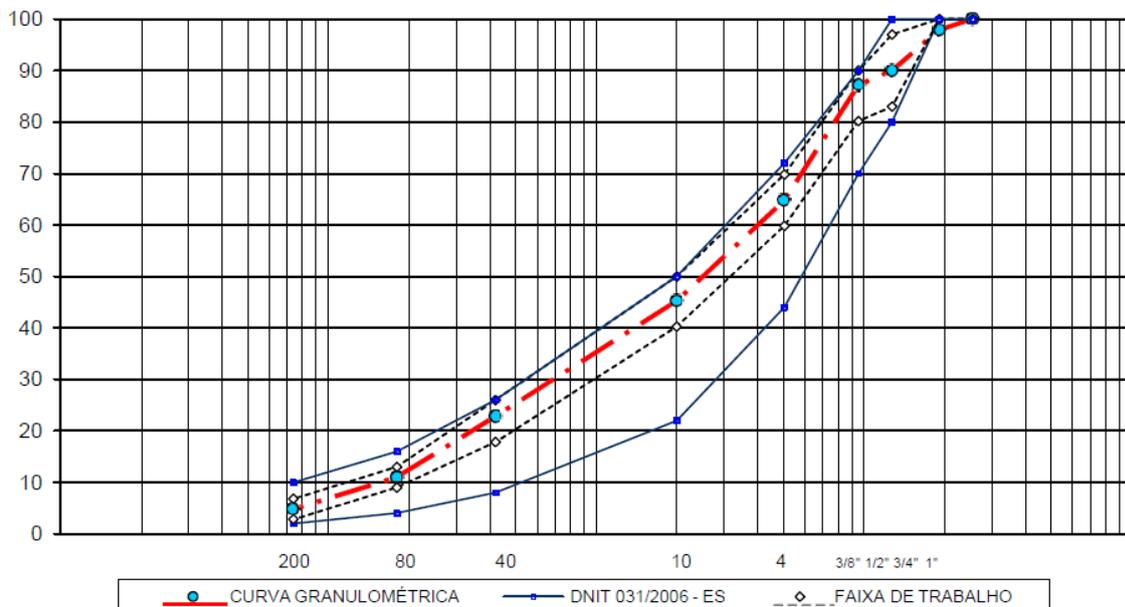
ANEXO V – Traço de C.B.U.Q. Modificado Extração em
pista



CONTROLE DE CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE

OBRA : Usina do Setrap	TRECHO: com brita 1"	Data: 21/05/2018	REG. 002
EMPRESA: GEA	APLICAÇÃO: CBUQ. Fixa - C - DNIT	ENSAIO: Extração de pista	

ENSAIO MARSHALL				EXTRAÇÃO DE BETUME					
C.P. Nº	01	02	03	MÉDIA	TARA	01			
PESO AO AR	704,3	704,3			AMOSTRA + TARA				
P. IMERSO	389,2	389,2			AMOSTRA			529,20	
P. CESTO IMERSO	-	-	-		INSOLÚVEL			504,60	
VOLUME cm ³	315,2	315,2			SOLÚVEL			24,60	
DENS. APARENTE	2,235	2,235		2,235	TEOR DE BETUME (%)			4,65	
DENS. TEÓRICA	2,449	2,449			GRANULOMETRIA				
% VAZIOS	8,7	8,7		8,7	PENEIRAS		PESO	PESO	%
% V.C.B.	10,09	10,09			POL.	mm.	RETIDO	PASSANDO	PASSANDO
% V.A.M.	18,79	18,79			2"	50,800			
% R.B.V.	53,7	53,7		53,7	1 1/2"	38,100			
LEIT. DEFLECT.	290	290			1"	25,400		503,2	100,0
EST. ENCONTRADA	382,85	379,89			3/4"	19,100	10,7	492,6	97,9
FATOR CORREÇÃO	2,78	2,78			1/2"	12,700	39,4	453,1	90,0
EST. CORRIGIDA	1.213	1.064		1.213	3/8"	9,520	14,3	438,8	87,2
FLUÊNCIA (mm)	3,02	3,01		3,0	Nº 4	4,760	112,7	326,2	64,8
TEMPERATURAS °C					Nº 10	2,000	98,1	228,0	45,3
TEMPERATURA DA MOLDAGEM:					Nº 40	0,420	113,3	114,7	22,8
TEMPERATURA DA MASSA:					Nº 80	0,180	59,2	55,6	11,0
TEMPERATURA DO LIGANTE :					Nº 200	0,074	31,5	24,1	4,8
F.C. DO ANEL:				1,32016	FUNDO		24,1		



RESPONSÁVEL PELO LABORATÓRIO :

LABORATÓRIO DE ENGENHARIA LTDA.
Francisco Alves de Brito
 Laboratorista-AP