



**UFAM**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA  
DE MATERIAIS**

**Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas com Agregados  
Sinterizados de Argila Calcinada**

**MÁRIO JORGE ANDRADE DA CUNHA**

MANAUS  
2014



**UFAM**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA  
DE MATERIAIS**

**MÁRIO JORGE ANDRADE DA CUNHA**

**Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas com Agregados  
Sinterizados de Argila Calcinada**

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

**ORIENTADORA: Prof.<sup>a</sup> Dra. Consuelo Alves da Frota**

MANAUS  
2014

## Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

A553c Andrade da Cunha, Mário Jorge  
Comportamento mecânico de misturas asfálticas com agregados sinterizados de argila calcinada / Mário Jorge Andrade da Cunha. 2014  
61 f.: il. color; 30 cm.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Consuelo Alves da Frota  
Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Agregados sinterizados de argila calcinada. 2. Misturas asfálticas. 3. Resistência à Tração. 4. Módulo de Resiliência. 5. Vida de Fadiga. I. Frota, Prof<sup>a</sup>. Dra. Consuelo Alves da II. Universidade Federal do Amazonas III. Título



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA  
DE MATERIAIS**

**MÁRIO JORGE ANDRADE DA CUNHA**

**Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas com Agregados  
Sinterizados de Argila Calcinada**

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

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof.<sup>a</sup> Dra. Consuelo Alves da Frota, Presidente**  
**Universidade Federal do Amazonas**

---

**Prof. Dr. Hidembergue Ordozgoith da Frota, Membro Interno**  
**Universidade Federal do Amazonas**

---

**Prof. Dr. Raimundo Humberto Cavalcante Lima, Membro Externo**  
**Universidade Federal do Amazonas**

Dedico este trabalho aos amores da minha vida: Flor, meus pais e irmãos. Por todo amor e apoio doado, agradeço de todo coração.

## **AGRADECIMENTOS**

Parece que foi fácil chegar até aqui. Os desavisados terão essa impressão.

Em tempos onde o ter importa mais que o ser, poucos são os que realmente acompanharam e contribuíram para a superação das dificuldades enfrentadas ao longo de todo o trajeto. A estes, registro meus eternos agradecimentos.

Quero agradecer primeiramente a Deus, por mais essa vitória em minha vida, e por ter consciência de que se fui agraciado com mais esta conquista é porque ela estava nos planos dele para mim.

Aos meus pais, Sra. Mercês e Sr. Jorge, pelo zelo de toda uma vida. Sempre foi meu objetivo ouvir e obedecer, mesmo não entendendo o porquê, por diversas vezes, e estou certo de que tenho cumprido o desejo de ambos sendo um garoto aplicado nos estudos, íntegro em minhas atitudes, justo em minhas decisões, fiel aos princípios aprendidos desde pequeno. Por fim, obrigado aos dois por terem me convencido, pelo exemplo, da importância dos estudos em minha vida.

Minha Flor, Luana, a flor que veio para dar sentido e beleza a minha vida. Agradeço, todos os dias, por tê-la como esposa, fiel, guerreira e companheira de todas as horas. Desde os primeiros momentos, nos corredores da UFAM, não nos separamos mais, e assim será por toda nossa vida. Ninguém participou, tão intensamente, dos estudos que deram origem a este trabalho quanto a minha Flor, e somente ela sabe quanto batalhamos juntos por mais essa conquista. Estaremos juntos, para o que der e vier, meu anjo. Sempre.

Agradeço à Professora Consuelo Alves da Frota pelo apoio incondicional, por todas as palavras ditas, pelo incentivo desde certo encontro dentro de uma biblioteca, quando relatou a mim sua certeza em relação ao meu potencial profissional. Quanta sabedoria esculpida e alicerçada em simplicidade, desprovida de qualquer vaidade. Exemplo de vida.

Aos meus irmãos e parentes próximos, agradeço toda sorte desejada. Espero ser um bom exemplo com meus atos.

Dentro do Grupo de Geotecnia, quero desejar os mais sinceros votos de estima e consideração a todos os integrantes, em especial aos amigos Cleudinei Lopes, Marcos Raiker, Patrícia Valença, Maurício Soares e Dona Meire.

Por fim, agradeço às instituições de fomento a pesquisa que me concederam bolsa de estudo, tendo sido de suma importância à continuidade e manutenção do presente trabalho: Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Amazonas (FAPEAM).

## RESUMO

Estudou-se o Agregado Sinterizado de Argila Calcinada (ASAC), como agregado graúdo, em substituição ao seixo para misturas asfálticas do tipo CA. Teve-se como objetivo encontrar materiais alternativos a serem utilizados em obras de pavimentação no Município de Manaus (AM). Participaram também dos compósitos betuminosos o ligante CAP 50/70, comercializado na Região Amazônica, a areia (agregado miúdo) e o cimento *portland* (fíller). A granulometria da mistura seguiu o Método de Bailey, visando propiciar um melhor intertravamento das partículas. Analisou-se o comportamento mecânico pelos ensaios de resistência à tração (RT), módulo de resiliência (MR) e vida de fadiga, com variação da temperatura, para também verificar o comportamento em serviço. Os resultados mostraram, em geral, valores superiores para a mistura com agregados de argila, quando comparada ao compósito com agregado natural.

**PALAVRAS-CHAVE:** agregado sinterizado de argila calcinada, misturas asfálticas, método de Bailey, resistência à tração, módulo de resiliência, vida de fadiga.



## **ABSTRACT**

The synthesized calcined clay was studied, as coarse aggregate, replacing the pebble in asphalt mixtures for asphalt concrete. It aims to find alternative materials to use in pavements for the city of Manaus. Also participated in the bituminous composite the binder AC 50/70, marketed in the Amazon region, sand (fine aggregate) and *portland* cement (filler). The grain size of the mixture followed the method of Bailey, with the goal of providing a better interlocking of particles. The mechanical behavior was analyzed according to the testing of tensile strength (RT), the resilient modulus (MR) and fatigue, with temperature variation, in order to also check the behavior in service. The results showed, in general, higher values for mixtures with clay aggregates, compared to the natural aggregate composite.

**KEYWORDS:** synthesized calcined clay Aggregate, asphalt mixtures, Bailey method, tensile strength, resilient modulus, fatigue.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xii
1. INTRODUÇÃO.....	14
2. OBJETIVOS.....	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
4.1. Confeção dos Agregados Sinterizados de Argila Calcinada (ASAC).....	21
4.2. Agregados graúdos.....	22
4.3. Agregados miúdos.....	23
4.4. Cimento Asfáltico de Petróleo.....	23
4.5. Material de enchimento.....	24
4.6. Dosagem das misturas asfálticas.....	25
4.6.1. Definição das Faixas Granulométricas.....	25
4.6.2. Determinação do teor de projeto.....	27
4.6.3. Método de composição das misturas.....	29
4.7. Ensaio mecânicos.....	30
4.7.1. Resistência à Tração por compressão diametral.....	30
4.7.2. Módulo de Resiliência.....	33
4.7.3. Vida de Fadiga.....	35
5. RESULTADOS.....	39
5.1. Caracterização dos materiais.....	39
5.1.1. Amostra SUC.....	39
5.1.2. Agregados graúdos (ASAC e Seixo).....	41
5.1.3. Agregados miúdos e material de enchimento.....	42
5.1.4. Caracterização do ligante.....	44
5.2. Caracterização da mistura asfáltica do tipo Cimento Asfáltico (CA).....	45

5.3. Caracterização Mecânica .....	47
5.3.1. Resistência à Tração .....	47
5.3.2. Módulo de Resiliência .....	49
5.3.3. Vida de Fadiga.....	52
6. CONCLUSÕES .....	54
6.1. Caracterização dos materiais .....	54
6.2. Caracterização da mistura asfáltica tipo Cimento Asfáltico (CA) .....	55
6.3. Ensaio Mecânicos .....	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	57

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Rodovias federais no Estado do Amazonas .....	15
Figura 2 – Jazida Urucu: Amostra SUC .....	21
Figura 3 – Faixa Granulométrica Superpave, DMN 19,0 mm .....	27
Figura 4 – Representação da determinação do teor de projeto.....	28
Figura 5 – Esquema do ensaio de compressão diametral .....	31
Figura 6 – Prensa UTM e detalhe da célula de carga .....	32
Figura 7 – Equipamento UTM.....	32
Figura 8 – Preparação do corpo de prova para o ensaio de MR.....	35
Figura 9 – Curva granulométrica da amostra SUC.....	40
Figura 10 - Curva granulométrica dos agregados graúdos .....	41
Figura 11 - Curvas granulométricas dos agregados miúdos.....	43
Figura 12 - Curva granulométrica do fíler.....	44
Figura 13 - Curvas granulométricas das misturas (CA/Seixo e CA/ASAC).....	46
Figura 14 - Teor de projeto da mistura com ASAC .....	47
Figura 15 - Teor de projeto da mistura com Seixo .....	47
Figura 16 - Resistência à tração x Temperatura .....	48
Figura 17 - Módulo de Resiliência da Mistura com Seixo .....	49
Figura 18 - Módulo de Resiliência da Mistura com ASAC .....	50
Figura 19 - Módulo de Resiliência x Temperatura das misturas com Seixo e ASAC .....	51
Figura 20 - Vida de Fadiga para a Mistura Seixo.....	52
Figura 21 - Vida de Fadiga para a Mistura ASAC .....	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Localização da jazida, Amostra SUC .....	21
Tabela 2 – Caracterização do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP).....	24
Tabela 3 – Especificação para material Fíler.....	25
Tabela 4 – Especificação granulométrica da faixa Superpave, DMN 19,0 mm.....	26
Tabela 5 – Valores para o Coeficiente de Poisson em função da temperatura.....	35
Tabela 6 - Índices de Consistência SUC .....	40
Tabela 7 - Caracterização dos agregados graúdos.....	42
Tabela 8 - Caracterização dos agregados miúdos.....	43
Tabela 9 - Ensaio tradicionais de caracterização do CAP 50/70 .....	44
Tabela 10 - Composição das misturas do Tipo CA.....	46

## LISTA DE ABREVIATURAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
AAUQ	Areia asfalto usinada a quente
ABCP	Associação Brasileira de Cimento <i>Portland</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Abs	<i>Absorption</i>
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASAC	Agregado Sinterizado de Argila Calcificada
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CA	Concreto Asfáltico
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CP	Corpo-de-prova
DC	Deformação Controlada
DMN	Diâmetro Máximo Nominal
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagens
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DRF	Distrito Rodoviário Federal
DSR	<i>Dynamical Shear Rheometer</i>
<i>E</i>	Módulo de Elasticidade
GEOTEC	Grupo de Geotecnia
Gmm	<i>Maximum Specific Gravity</i>
GPS	<i>Global Position System</i>
Gsa	<i>Apparent Specific Gravity</i>
Gsb	<i>Bulk Specific Gravity</i>
Gsbssd	<i>Bulk Specific Gravity in the condition Saturated Surface Dry</i>
Gse	<i>Effective Specific Gravity</i>
IDOT	<i>Illinois Department of Transports</i>
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transducer</i>
MR	Módulo de Resiliência
MT	Ministério dos Transportes
N	Vida de Fadiga

NBR	Norma Brasileira
Pba	<i>Percent Absorbed Binder</i>
PC	Ponto de Controle
PG	<i>Performance Grade</i>
RBV	Relação Betume-Vazios
Reman	Refinaria de Manaus Isaac Sabbá
RT	Resistência à Tração
RTFOT	<i>Rolling Thin Film Over Test</i>
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
Superpave	<i>Superior Performance Asphalt Pavements</i>
TC	Tensão Controlada
TRB	<i>Transportation Research Board</i>
UFAM	Universidade Federal do Amazonas
UTM	<i>Universal Technical Machine</i>
VAM	Vazios no agregado mineral
Vv	Volume de Vazios
Wul	<i>Loose Unit Weight</i>
Wur	<i>Rodded Unit Weight</i>
ZR	Zona de Restrição
$\mu$	Coeficiente de Poisson

## 1. INTRODUÇÃO

O Estado do Amazonas apresenta crônica deficiência de infraestrutura rodoviária, oriunda, em geral, da formação geológica superficial, agravada pelas restrições impostas pela legislação ambiental, culminando, assim, na carência de matéria-prima (agregado pétreo), a exemplo do subsolo do Município de Manaus, cuja camada superficial é constituída por 62% de argila, 34% de areia e 4% de laterita e Arenito-Manaus (BENTO e FROTA, 1998).

O citado ente federativo possui uma área de 1.559.159,15 km<sup>2</sup>, ocupando o posto de Estado com maior extensão territorial na grande faixa da Floresta Amazônica. É cortado por imensa rede fluvial, crucial para o transporte na região. Destaca-se, ainda, o regime pluviométrico, com índices elevados, da ordem de 1800 a 2500mm por ano. Tais características, somadas àquelas acima mencionadas, mostram a considerável dificuldade para se realizar a construção civil nessa região.

Como solução, para fazer frente às citadas dificuldades de ordem logística, geográfica, geológica e geotécnica, as vias do Município de Manaus utilizam o seixo, extraído do leito dos rios regionais, em função do elevado custo da brita. Porém, a extração desse material aluvionar acarreta uma remodelagem dos perfis transversais e longitudinais de suas calhas, modificando a dinâmica de escoamento do curso hídrico. A referida atividade pode levar ao assoreamento da calha fluvial e ao desenvolvimento prematuro de processos erosivos, além dos incontáveis danos ambientais ao bioma e à biota locais.

Em consequência desse contexto desfavorável a obras de Engenharia Civil e ao transporte rodoviário, tem-se a presença de reduzido número de rodovias federais, conforme informa o Ministério dos Transportes – MT (Figura 1), podendo-se citar a BR-174, que liga Manaus à Boa Vista (RR), a qual apresenta condições razoáveis de trafegabilidade, se comparada a outras existentes na Região, como a BR-210, a BR-230, a BR-307, a BR-317 e a BR-319.



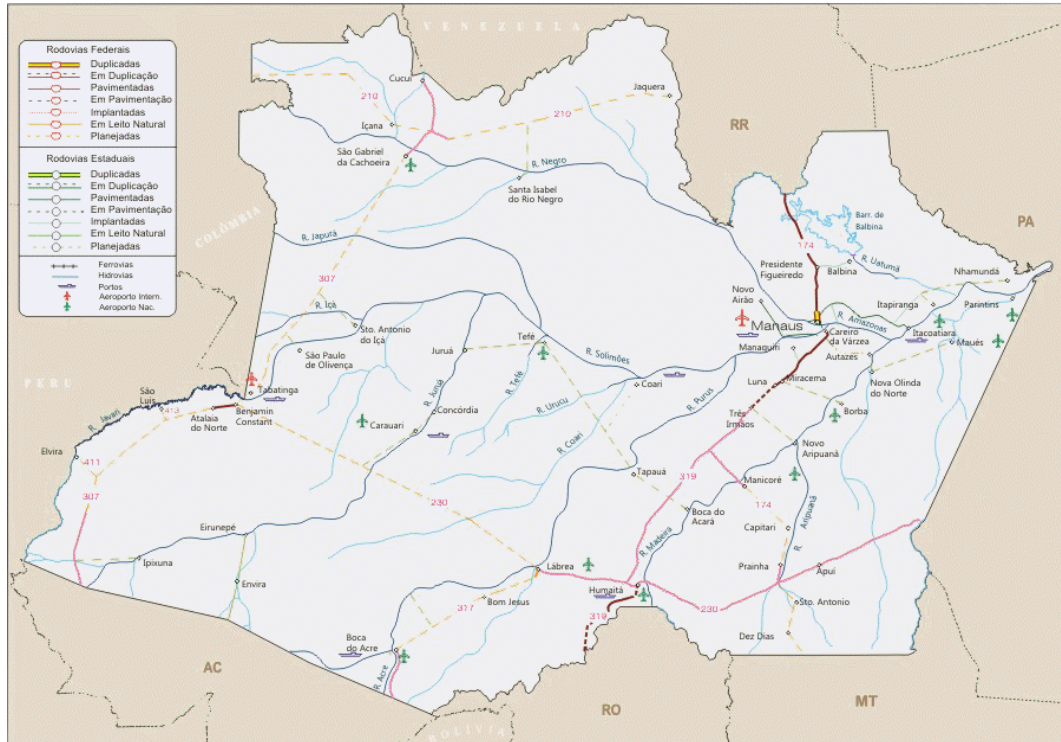


Figura 1 – Rodovias federais no Estado do Amazonas  
 FONTE: Ministério dos Transportes (BRASIL, 2014)

Em decorrência dessa histórica escassez de material pétreo e, ao mesmo tempo, em virtude da elevada distância das poucas jazidas superficiais encontradas na Região, evidenciam-se expressivos os custos da construção de pavimentos, o que torna premente a busca por insumos alternativos, adequados sob o prisma tanto da economicidade quanto da proteção ambiental.

A comunidade científica, notadamente na área de Geotecnia, tem se empenhado, ao longo das últimas décadas, em estudar e pesquisar materiais alternativos, possíveis de serem aplicados nos serviços de pavimentação, tal qual o agregado sinterizado de argila calcinada (ASAC) em misturas asfálticas, objeto do estudo em pauta.

## 2. OBJETIVOS

### Geral

Avaliar o comportamento mecânico de misturas asfálticas com o agregado sinterizado de argila calcinada (ASAC), a fim de contribuir para utilização desse material na construção regional de pavimentos.

## **Específicos**

- Comparar o comportamento mecânico das misturas asfáltica com ASAC relativo ao compósito com seixo;
- Avaliar o efeito da variação da temperatura na resistência à tração, no módulo de resiliência e na vida de fadiga;
- Contribuir para ampliar e difundir as pesquisas que envolvem o ASAC, como material alternativo e tecnicamente viável à pavimentação regional.

## **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

O pavimento é uma estrutura composta por camadas superpostas, com espessuras finitas, assentadas em terreno de fundação (subleito), com objetivo de resistir aos esforços verticais (predominantes) provenientes do tráfego e distribuí-los às camadas inferiores. Os pavimentos podem ser classificados em dois tipos: rígidos ou flexíveis.

Entre as camadas formadoras do pavimento, o revestimento, posicionado no topo da estrutura, pode ser impermeável, a depender do projeto, recebe diretamente a ação do tráfego e deve resistir ao desgaste. Quanto aos diversos tipos de revestimentos betuminosos, merece destaque o concreto asfáltico (CA), consistindo em uma mistura densa de materiais minerais e um ligante asfáltico.

Por ser um importante tema de pesquisa, no que concerne a substituição da fração graúda em misturas asfálticas - frente à escassez de materiais pétreos em regiões desprovidas de jazidas superficiais, a exemplo da Região Amazônica, os agregados artificiais de argila vêm sendo pesquisados no Brasil desde final da década de 70, a fim de serem utilizados para as mais diversas aplicações na construção civil.

O citado agregado é um produto, que ao ser previamente processado, resulta na transformação de um solo argiloso em um material inerte, resistente mecanicamente à

determinada aplicação técnica (CETEM, 2007). Estão divididos em duas classes: leves (expandido) e calcinados.

O Departamento de Infraestrutura de Transportes (DNER, 1981) *apud* Batista (2004), informa que as primeiras tentativas de aplicação do agregado artificial expandido em obras de pavimentação ocorreram na década de 1960 nos Estados do Texas e Louisiana (EUA). O Departamento de Estradas do Texas ao estudar amostras de argilas moldadas próximas ao limite de plasticidade (cilindros com 125 mm de diâmetro por 380 mm de comprimento), para o emprego em camadas de base e revestimento, concluiu que os argilo-minerais do tipo montmorilonita, illita e caulinita não se reidratam em condições ambientes, quando completamente desidratados por meio de tratamento térmico à temperatura de 760°C. Completam ainda que, praticamente, todo solo argiloso que possua uma razoável resistência à compressão manual, quando seco ao ar, após a moldagem umedecida em forma de pelotas, poderiam servir como matéria-prima para a produção desse material com características técnicas satisfatórias.

No Brasil os primeiros estudos sobre a viabilidade de aplicação de agregados artificiais de argila foram conduzidos, entre 1978 e 1981, pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR/DNER) e versavam acerca da possibilidade de implantação de uma fábrica de argila expandida na Região Amazônica. Realizaram levantamentos geológicos e prospecção de jazidas de materiais argilosos, resultando na coleta de cerca de 200 amostras alusivas a onze diferentes locais nos Estados do Amazonas, Pará e Acre. Tais amostras serviram para produzir agregados de argila a temperaturas entre 1050°C e 1300°C, os quais foram submetidos aos ensaios padronizados, segundo a metodologia do Instituto do Texas. Avaliaram-se a Perda ao fogo e Desgaste após fervura, indicando que a maioria das amostras não era propícia para confecção de agregados leves, contudo, na quase totalidade satisfatória para a produção de agregado calcinado.

Destaca Batista (2004) que o agregado de argila empregado em serviços de pavimentação não deve necessariamente constituir-se de argila expandida, pois uma argila calcinada, com ponto de fusão mais baixo, oferece um agregado com maior peso específico, sendo o seu emprego mais indicado a este tipo de aplicação. O citado autor indica que os estudos preliminares acerca da utilização desse agregado foram desenvolvidos pelo Exército Brasileiro, entre os anos de 1998 e 2000, por meio do Instituto Militar de Engenharia (IME).

No Estado do Amazonas, o Grupo de Pesquisa em Geotecnia (GEOTEC) da Universidade Federal do Amazonas (UFAM), ciente da problemática de material pétreo na região, tem desenvolvido pesquisas. Tendo sido estudadas as propriedades físicas e mecânicas decorrentes, em geral, da substituição do seixo pelo material calcinado em misturas asfálticas e na estabilização de solos.

No início dos estudos com os agregados alternativos, conforme Frota *et al.* (2003, 2006a) e Silva *et al.* (2008b), a produção realizava-se de forma artesanal, de acordo com as seguintes etapas: a) homogeneização; b) moldagem, por meio de corte com uso de tela; c) secagem dos moldes, ao ar livre ou em estufa; d) calcinação em forno à temperatura aproximada de 900°C. Concluíram que os agregados obtidos, por meio de ensaios físicos e mecânicos, mostraram viabilidade técnica na substituição do seixo quando participe de misturas asfálticas.

Posteriormente, buscando viabilizar a produção de agregado de argila calcinada em escala industrial — frente à técnica manual e artesanal, e para que os agregados artificiais pudessem ser produzidos com rapidez, na forma e dimensões desejadas, Silva *et al.* (2008<sup>a</sup> e 2009) descreveram a produção de ASAC nas instalações de duas empresas, uma cerâmica (Iranduba-AM) e outra responsável pela britagem, com material argiloso de Urucu-AM. Segundo os autores, a confecção dos agregados seguiu as etapas: a) colocação do solo argiloso em silo; b) trituração; c) homogeneização com adição de água; d) moldagem de

tijolos maciços, por extrusão, medindo 60×110×200 mm e com dois furos centrais de diâmetro igual a 16 mm; e) secagem em forno tipo túnel; f) aquecimento gradual, em um período de 8 a 12 horas, até atingir a temperatura de 600°C, aumentando-se posteriormente a temperatura até 900°C; g) resfriamento gradual dos tijolos ao longo de dois dias; e h) britagem dos tijolos correspondentes aos tamanhos de brita 0, 1, 2 e 3. Ao final do processo produtivo, realizaram-se ensaios físicos, especificados por meio de normativos do DNIT e ABNT, sendo validados os agregados industrializados obtidos (ASAC).

Frota *et al.* (2004a) relatam a diferença entre os diferentes tipos de solos indicados para a fabricação de agregados artificiais de argila. Os agregados leves são produzidos a partir de argilo-mineral que apresente propriedade piroexpansiva, ou seja, no aquecimento da massa ocorre a liberação de gases, produzindo vazios intersticiais, com conseqüente redução da massa específica aparente, produzidos a temperaturas elevadas, entre 1000°C e 1350°C. Já os agregados de argila não expansiva, indicadas para o processo de calcinação, devem apresentar elevada plasticidade, baixo ponto de fusão e presença de óxidos ferrosos.

Na mesma linha de investigação Frota *et al.* (2006b) e Silva *et al.* (2008a; 2009) estudaram solos oriundos da província de Urucu-AM, bem como Frota *et al.* (2007) e Cavalcante *et al.* (2011b) com amostras de jazidas retiradas ao longo da BR-319, tendo evidenciado alto potencial para obtenção de argila não expansiva.

Com fito de avaliar misturas asfálticas confeccionadas com o ASAC e seixo, diversos estudos - Frota *et al.* (2004b, 2007), Batista *et al.* (2004) e Cavalcante *et al.* (2011b), abordaram a resposta de ensaios mecânicos (Resistência à Tração por compressão diametral, Módulo de Resiliência, *Creep* estático, Vida de Fadiga e Estabilidade Marshall), que indicaram satisfatórios resultados, levando a concluir pela viabilidade técnica de uso do ASAC em misturas asfálticas em substituição ao agregado aluvionar.

À exemplo do Grupo de Geotecnia da UFAM, outras importantes instituições de ensino e pesquisa, de diversas regiões do Brasil, têm publicado trabalhos mostrando a preocupação da escassez de agregado graúdo para a confecção de misturas asfálticas, particularmente destinadas a Região Amazônica, conforme exposto nos estudos de Batista (2004), Cabral (2005, 2011), Nascimento (2005), Silva (2006), Nunes (2006), Santos (2007) e Santos (2008). Concluem pelo atendimento dos parâmetros físicos e ao comportamento mecânico dos compósitos com agregados calcinados, quando comparados às misturas com seixo.

Em estudo recente, Silva e Frota (2013) quantificaram os custos envolvidos na fabricação do ASAC no Estado do Amazonas relativo ao seixo, visando à construção civil. Discorreram, com propriedade, acerca das principais variáveis na produção desses materiais como agregado graúdo. Concluíram: a) quanto ao ASAC, o principal custo na cadeia produtiva é a etapa de calcinação; b) referente ao seixo, o custo direto mais expressivo relaciona-se ao transporte do agregado até o local da obra; c) que até o momento, não é viável financeiramente a produção de ASAC visando atender ao mercado da construção civil na cidade de Manaus; e d) a produção do ASAC direto no canteiro das obras (com distância de 100 km a partir da capital), indica o custo direto do processo produtivo (dados de 2012) igual a R\$ 127,38 por metro cúbico, correspondendo um valor 56% inferior ao custo de disponibilização do seixo, qual seja, R\$ 289,91 por metro cúbico.

Pelo exposto, tem-se que o agregado sinterizado de argila calcinada, notadamente, participando dos compósitos asfálticos, tem se mostrado tecnicamente viável, com fito de atender a ausência de jazidas superficiais para obtenção de material pétreo, em particular destinado à Manaus. Porém, esbarra, no presente, quanto à vertente econômica, que igualmente deve ser atendida para fins de validá-lo como material alternativo para a construção civil.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta as características dos materiais, os ensaios realizados com os respectivos procedimentos, e os equipamentos para a execução dos procedimentos laboratoriais.

### 4.1. Confecção dos Agregados Sinterizados de Argila Calcinada (ASAC)

A jazida do material (Figura 2) utilizada na confecção do ASAC (Amostra SUC) está situada em Urucu (Base Petrolífera da Petrobras) no Município de Coari-AM, distante aproximadamente 650 km de Manaus. Sua localização geográfica identificada com auxílio de um GPS “Garmin Navigator”, na Projeção Latitude e Longitude, DATUM SAD69, consta na Tabela 1.

Amostra	Localização	Coordenadas
SUC	Urucu – Coari/AM	S04°59'01,68”
		W065°19'59,20”

Tabela 1 – Localização da jazida, Amostra SUC



Figura 2 – Jazida Urucu: Amostra SUC

Os agregados sinterizados com argila da Amostra SUC foram produzidos em uma empresa cerâmica no município de Iranduba-AM, a partir de tijolos maciços no formato 60×110×200 mm com dois furos centrais de  $\varnothing$  16 mm, sendo posteriormente britados em outra empresa, de acordo com as granulometrias de brita 0, brita 1, brita 2 e brita 3.

O material argiloso, oriundo de Urucu (Amostra SUC), foi submetido aos experimentos padronizados segundo as especificações do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), com a finalidade de validar seu potencial à calcinação. Realizaram-se os seguintes ensaios: a) com amostra natural, análise granulométrica (ABNT NBR 7181, 1984), limite de liquidez (ABNT NBR 6459, 1984) e limite de plasticidade (ABNT NBR 7180, 1984); e b) com os agregados sinterizados de argila, seleção expedita pelo Processo de Fervura (DNER ME 223, 1994), determinação da Perda de Massa após Fervura (DNER ME 225, 1994) e desgaste por Abrasão “Los Angeles” (DNER ME 222, 1994).

#### **4.2. Agregados graúdos**

Analisando a produção de ASAC por meio de processo industrial em uma empresa cerâmica Silva *et al.* (2008a) constataram como vantagens: a) obtenção de maior quantidade em menor tempo; b) granulometria contínua; c) diminuição da absorção e; e) eliminação da interferência humana no processo fabril.

No caso da lavra do seixo, esta é obtida, em geral, por meio de dragas de sucção motorizadas acopladas às balsas. É extraída, principalmente, do leito dos rios Aripuanã (principal fornecedor do Estado do Amazonas), Japurá, Uatumã (atende a cidade de Manaus), Negro e Nhamundá. Tais balsas possuem capacidade de 400 a 1.400m<sup>3</sup>, percorrendo consideráveis distâncias, como exemplo o percurso de aproximadamente 300 km, entre o local de extração no Rio Negro e Manaus.

Avaliaram-se os agregados graúdos (argila calcinada e seixo), quanto à granulometria (ASTM C136, 1995) e por meio da norma ASTM C127 (1988) para determinação dos parâmetros: *G<sub>sa</sub>* (*Apparent Specific Gravity*), *G<sub>sb</sub>* (*Bulk Specific Gravity*), *G<sub>sb<sub>ssd</sub></sub>* (*Bulk Specific Gravity in the condition Saturated Surface Dry*), e *absorption*. Determinaram-se também as suas Massas Específica Solta e Compactada (*W<sub>ur</sub>* – *Rodded Unit Weight and W<sub>ul</sub>*



– *Loose Unit Weight*), de acordo com (AASHTO T19, 1997) e o desgaste pela Abrasão “Los Angeles” (ASTM C131, 1996).

### **4.3. Agregados miúdos**

Para o presente estudo selecionaram-se três variedades de agregado miúdo: a) Areia Coari, proveniente do município de igual nome; b) Areia Mao, habitualmente utilizada nas obras de engenharia da cidade de Manaus; e c) Areia ASAC, resultante da britagem dos tijolos no processo de produção dos agregados sinterizados, visando proporcionar um melhor aproveitamento do agregado calcinado, além de oferecer material alternativo às areias naturais. Tais amostras caracterizaram-se quanto à granulometria (ASTM C136, 1995), G<sub>s</sub>a (Apparent Specific Gravity), G<sub>s</sub>b (Bulk Specific Gravity) e absorption, segundo a (ASTM C128, 1993), e Massas Específicas Compactadas (Rodded Unit Weight) de acordo com a (AASHTO T19/T 19 M-93, 1997).

### **4.4. Cimento Asfáltico de Petróleo**

Grande parte dos países no mundo usa a pavimentação asfáltica como principal forma de revestimento, e no Brasil cerca de 95% das vias pavimentadas são confeccionadas com este tipo de revestimento betuminoso. O asfalto é uma mistura de hidrocarbonetos, derivada do petróleo por processo natural ou por destilação, tendo como principal componente o betume, podendo conter entre outros materiais, oxigênio, nitrogênio e enxofre.

O asfalto, utilizado em obras de pavimentação, é um tipo de ligante betuminoso obtido pela destilação do petróleo, funciona como adesivo termoplástico, impermeável à água e pouco reativo, sendo comumente denominado no Brasil de cimento asfáltico de petróleo (CAP). Enquadra-se em uma determinada classificação, baseada em certas propriedades físicas desejáveis para o desempenho do material quando aplicado em serviços de pavimentação.

Na Tabela 2 são apresentados os resultados dos ensaios, segundo a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP); referente ao asfalto empregado como ligante no estudo em pauta, fornecido pela Refinaria de Manaus Isaac Sabbá (UN-Reman).

Características	Und	CAP	CAP	CAP	CAP	Métodos	
		30 45	50 70	85 100	150 200	ABNT	ASTM
Penetração (100g,5s,25°C)	0,1mm	30 a 45	50 a 70	85 a 100	150 a 200	NBR 6576	D 5
Ponto de amolecimento, min.	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D 36
<b>Viscosidade SayboltFurol</b>							
a 135 °C, min.	s	192	141	110	80	NBR 14950	E 102
a 150 °C, min.	s	90	50	43	36		
a 170 °C	s	40 a 150	30 a 150	15 a 60	15 a 60		
<b>Viscosidade Brookfield</b>							
a 135 °C, min.	cP	374	274	214	155	NBR 15184	D 4402
a 150 °C, min.	cP	203	112	97	81		
a 177 °C, min.	cP	76 a 285	57 a 285	28 a 114	28 a 114		
Índice de suscetibilidade térmica		(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)		
Ponto de fulgor min.	°C	235	235	235	235	NBR 11341	D 92
Solubilidade em tricloroetileno, min.	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042
Ductilidade a 25 °C, min.	cm	60	60	100	100	NBR 6293	D 113
<b>Efeito do calor e do ar a 163 °C por 85 min</b>							
Varição em massa, max.	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5		D 2872
Ductilidade a 25 °C, min.	cm	10	20	50	50	NBR 6293	D 113
Aumento do ponto de amolecimento	°C	8	8	8	8	NBR 6560	D 36
Penetração retida, min.	%	60	55	55	50	NBR 6576	D 5

Tabela 2 – Caracterização do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

FONTE: UN-Reman

#### 4.5. Material de enchimento

Segundo a Associação Brasileira de Cimento *Portland* (ABCP), em seu Guia básico de 2002, o cimento é um material fino, com propriedades aglutinantes, aglomerantes ou ligantes, e é composto por clínquer e adições. O fíler tem como principal função preencher os vazios existentes na mistura asfáltica, e os que surgem após acomodação e contato entre os outros materiais integrantes da mistura.

O citado clínquer é produzido a partir de calcário e argila. Com a britagem da rocha calcária, ocorre a moagem desse material e a mistura, em quantidades adequadas, de argila moída. Toda essa mistura é então levada a um forno giratório, que chega a atingir 1450°C de temperatura interna. O calor intenso aplicado forma um novo material (clínquer) que, após sair do forno, é resfriado e finalmente moído, passando a apresentar-se em forma de pó. As

mencionadas adições são matérias-primas que ao serem adicionadas na fase de moagem ao clínquer possibilitam a produção de diversos tipos de cimento aplicáveis aos diferentes tipos de serviços, por exemplo, como gesso, escória de alto-forno, materiais pozolânicos ou carbonáticos.

Selecionou-se para compor como material fíler o cimento *portland*, material usualmente aplicado nas composições das misturas asfálticas no Município de Manaus. Foi caracterizado pela massa específica real (DNER ME 085, 1994) e a granulometria, para verificação da aceitação ou rejeição como material de enchimento (DNER EM 367, 1997). A Tabela 3 mostra a granulometria sugerida pelo referido método.

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

Tabela 3 – Especificação para material Fíler

## 4.6. Dosagem das misturas asfálticas

### 4.6.1. Definição das Faixas Granulométricas

As especificações Superpave, quando tratam da distribuição granulométrica da mistura mineral, modificam a abordagem tradicional brasileira. Passou a adotar um gráfico, em que no eixo das abscissas tem-se abertura de peneiras (milímetros), elevado a uma potência  $n$  (em geral 0,45), e no eixo das ordenadas corresponde o percentual de agregados que passam em determinada abertura de peneira. A granulometria de uma mistura se baseia em quatro peneiras de controle: máxima nominal (2,36 mm) e a peneira com 0,075 mm de abertura, os chamados pontos de controle. Estes são delimitadores para o enquadramento da curva granulométrica.

Outro conceito importante refere-se à peneira de diâmetro máximo nominal (DMN), ou seja, a peneira de tamanho imediatamente acima daquela que reter mais de 10% do

material, e a peneira máxima que designa um tamanho de malha acima da peneira de tamanho máximo nominal, conforme Silva (2006).

As composições granulométricas das misturas asfálticas do Tipo Concreto Asfáltico (CA) seguirão as especificações de granulometria Superpave para Diâmetro Máximo Nominal (DMN) igual a 19,0 mm, conforme Tabela 4 e Figura 3 (SHRP, 1994a, 1994b).

São relevantes, no gráfico de distribuição mineral pela metodologia Superpave, dois importantes itens: a Zona de Restrição (ZR) e os Pontos de Controle (PC). Para que a graduação atenda esses critérios, a curva do esqueleto mineral deve passar entre os pontos de controle e por fora da zona de restrição. As misturas que passam pela ZR tendem a apresentar uma quantidade excessiva de material fino, e apresentam um esqueleto mineral frágil, com problemas no processo de compactação, e baixa resistência a deformações permanentes. Importa observar que a ZR foi proposta a fim de assegurar um mínimo de vazios na mistura mineral (Souza, 2007).

Peneira (mm)	% passando, em peso			
	Pontos de Controle		Zona de Restrição	
	Inferior	Superior	Inferior	Superior
25,0	100	-	-	-
19,0	90	100	-	-
12,5	-	90	-	-
9,5	-	-	-	-
4,75	-	-	-	-
2,36	23	49	34,6	34,6
1,18	-	-	22,3	28,3
0,6	-	-	16,7	20,7
0,3	-	-	13,7	13,7
0,15	-	-	-	-
0,075	2	8	-	-

Tabela 4 – Especificação granulométrica da faixa Superpave, DMN 19,0 mm

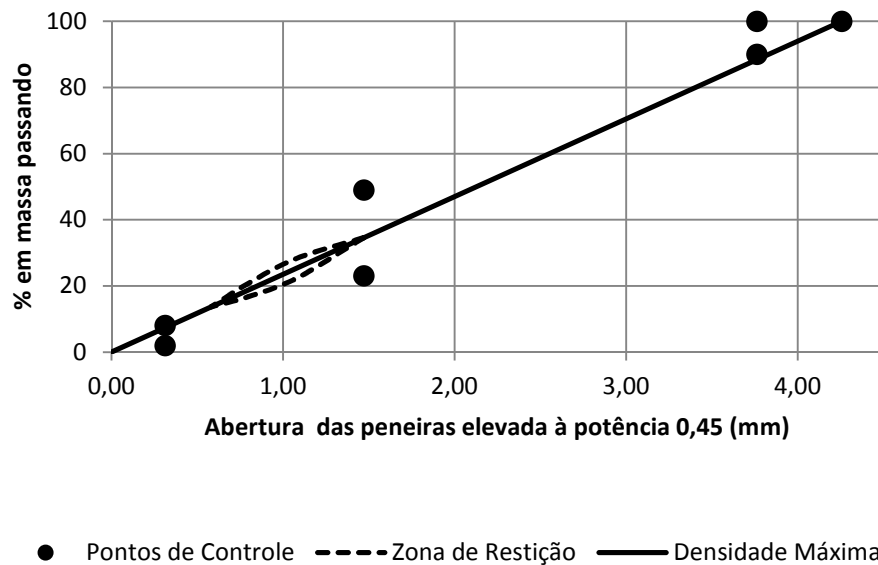


Figura 3 – Faixa Granulométrica Superpave, DMN 19,0 mm

#### 4.6.2. Determinação do teor de projeto

O teor de projeto (“ótimo”), em misturas asfálticas, varia de acordo com o método de dosagem, e é função de variáveis como a energia de compactação, tipo de mistura, e temperatura ao qual estará sujeito o pavimento. É usado como procedimento para definir a proporção entre agregados e aglutinantes capazes de resistir às cargas impostas pelas cargas. A dosagem mundialmente conhecido realiza-se pelo Método Marshall, sendo também o mais difundido no Brasil. Desenvolvido na década de 1940 e especificado por meio da norma DNER ME 043 (1995).

Diversos métodos de escolha do teor “ótimo” (projeto) podem ser utilizados, baseados determinados parâmetros, tais como: (1) volume de vazios ( $V_v$ ) igual a 4%; (2) estabilidade Marshall, média de três teores associados à máxima estabilidade e ao peso específico máximo da amostra compactada; (3) valor selecionado a partir de teores obtidos, para atender os limites de  $V_v$  e relação betume vazios (RBV).

Neste trabalho, o teor “ótimo” de ligante das misturas asfálticas foi estabelecido conforme método do 3º DRF/DNIT, que se fundamenta nos valores do Volume de Vazios ( $V_v$ ) e na Relação Betume-Vazios (RBV), bem como na especificação do Método *Marshall*

(DNER ME 043, 1995) referentes à Vv de 3% a 5% e RBV de 75% a 82%. Consiste na determinação dos referidos parâmetros para cinco grupos de corpos de prova cilíndricos (101,5mm de diâmetro e  $63,5 \pm 0,5$ mm de altura), com aplicação de 75 golpes por face, tendo cada grupo três corpos de prova com o mesmo teor de ligante. A Figura 4 apresenta um exemplo da aludida metodologia.

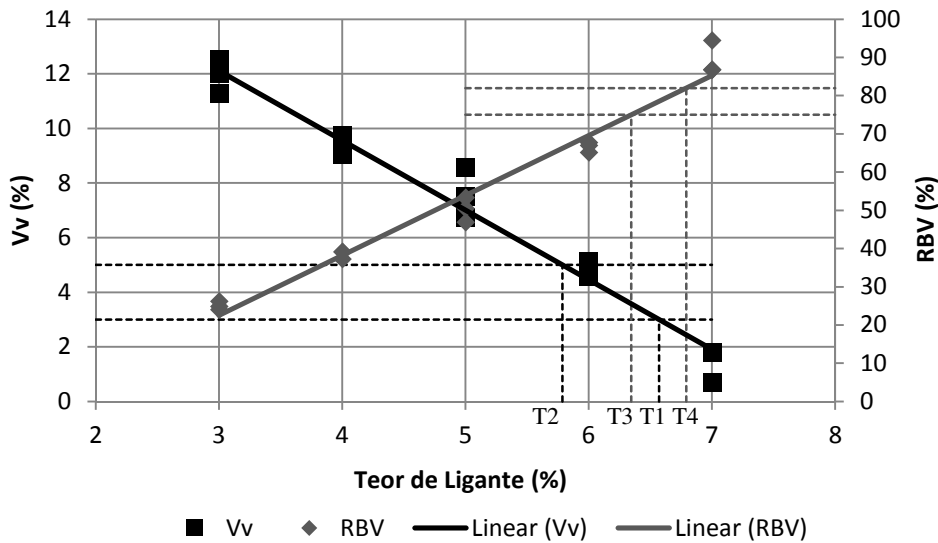


Figura 4 – Representação da determinação do teor de projeto

Com o objetivo de simular o efeito de condicionamento de curto prazo, antecedendo o processo de compactação, as misturas permaneceram duas horas em estufa, com temperatura  $10^{\circ}\text{C}$  superior à temperatura de compactação (AASHTO PP-2). No caso das temperaturas de preparo e compactação das misturas, estas seguirão as especificações do Método de Ensaio DNER ME 004 (1994).

Empregou-se no cálculo da Densidade Específica Máxima da mistura (Gmm) o método *Rice Test* (ASTM D 2041, 2000), o que permitiu encontrar a *percent absorbed binder* (Pba - porcentagem de ligante absorvida pelos agregados). Após a determinação da Gmm para o teor inicial de ligante, os demais teores calcularam-se com base na Superpave (SHRP, 1994a, 1994b).

### 4.6.3. Método de composição das misturas

O concreto asfáltico se constitui em mistura formada de agregados de diferentes tamanhos e ligante. O desempenho desta estrutura, no tocante ao comportamento mecânico (deformações permanentes, surgimento de trincas por fadiga), quando exposta às solicitações do tráfego e cargas aplicadas, depende, prioritariamente, das propriedades e proporção de cada fração dos materiais partícipes (Cunha, 2004). De maneira especial, os agregados compõem o esqueleto mineral da mistura, sendo responsáveis pela maior parcela da resistência aos esforços provenientes do tráfego, correlacionado à dureza, textura superficial, angularidade, forma e distribuição granulométrica.

No presente estudo os percentuais relativos a cada tipo de agregado componente da mistura tipo CA, inclusive o fíler, estabeleceram-se segundo o Método Bailey descrito no procedimento da Circular E-C044 (TRB, 2002). O engenheiro Robert Bailey, do Departamento de Transportes de Illinois (IDOT) desenvolveu uma seleção granulométrica, sendo empregado desde o início da década de 80. Por meio dos estudos de Vavrik *et al.* (2001, 2002a, 2002b), o aludido método vem sendo refinado, a fim de ser aplicado a qualquer mistura, independente do tamanho máximo do agregado.

Cunha (2004) cita que o Método Bailey está diretamente relacionado com as características de compactação de cada fração, o vazio dos agregados mineral (VAM) e o vazio da mistura (Vv). Busca um maior intertravamento por parte dos agregados graúdos, podendo ser utilizado em conjunto com qualquer dos métodos de dosagem de misturas, como o Superpave, Marshall, etc.

O intertravamento dos agregados é dado de entrada para os cálculos no Método Bailey, sendo o principal responsável pela resistência à deformação permanente da mistura asfáltica. Com o objetivo de assegurar uma quantidade ideal de asfalto, os vazios no agregado mineral (VAM) podem variar, para isso é preciso alterar a quantidade entre agregado graúdo e

miúdo, na mistura. Desta forma, nas misturas asfálticas pelo Método Bailey, o esqueleto mineral apresenta uma estabilidade satisfatória e um volume de VAM adequado, que possibilita uma boa durabilidade ao revestimento.

Os dados de entrada, de acordo com o Método de Bailey, foram os seguintes: a) densidade específica de cada agregado (Gsb); b) densidade específica solta dos agregados (Wul); c) densidade específica compactada dos agregados graúdos e finos (Wur); d) massa específica escolhida para os agregados graúdos; e) quantidade desejada dos agregados graúdos e finos; e f) quantidade almejada de material passante na peneira de abertura da malha igual a 0,075mm.

## **4.7. Ensaios mecânicos**

### **4.7.1. Resistência à Tração por compressão diametral**

O ensaio de Resistência à Tração (RT) é um importante teste para fins de caracterização de materiais como o concreto de cimento *portland* e misturas asfálticas. Devido à dificuldade em encontrar diretamente este parâmetro, diversos estudos pesquisaram a sua determinação de forma indireta.

O Método pioneiro nesse cálculo indireto foi desenvolvido pelo Professor Fernando Luiz Lobo Carneiro, do Rio de Janeiro, em cilindros de concreto, conhecido mundialmente como Ensaio Brasileiro. Tratava-se de um experimento em que são aplicadas duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão em um cilindro (Figura 5), e que geram, ao longo do diâmetro solicitado, tensões de tração uniformes e perpendiculares a essa dimensão. O ensaio se tornou popular mundialmente, não somente pela facilidade e rapidez de execução, mas também pelo fato de utilizar o mesmo CP e equipamento para a obtenção da resistência à compressão do concreto com cimento *portland*. Desde 1972 faz-se uso do ensaio da RT para a caracterização de misturas asfálticas.



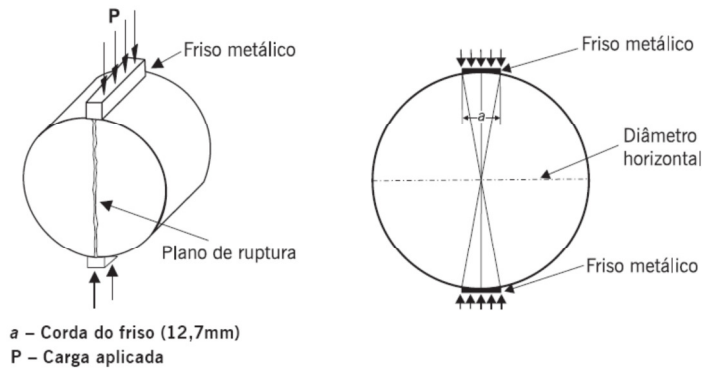


Figura 5 – Esquema do ensaio de compressão diametral  
FONTE: Adaptado de Medina e Motta (2005)

A determinação experimental da Resistência à Tração (RT) por compressão diametral em misturas asfálticas é especificado pela norma DNER ME 138 (1994). Solicita que sejam aferidas inicialmente as dimensões dos CP, sendo em seguida levados a uma prensa computadorizada. No presente caso uma UTM com interface gráfica (Máquina Universal de Ensaio – UTM 14), onde se aplicou uma força com taxa de deslocamento controlado de 0.8 mm/s até a ruptura dos mesmos. Com a obtenção do pico de carga de ruptura ( $F$ ), calculou-se a RT pela Equação 1.

$$\sigma_r = \frac{2F}{\pi D' h} \quad \text{Eq. 1}$$

$\sigma_r$  = resistência à tração, em MPa;

$F$  = carga de ruptura, em kN;

$D'$  = diâmetro do CP, em cm;

$h$  = altura do CP, em cm.

De acordo com a norma DNER ME 138 (1994) e para uso da Equação 1 assume-se que o CP rompe devido à tensão de tração uniforme gerada ao longo do diâmetro solicitado, que acaba por se igualar à tensão máxima admissível do material ( $\sigma_{adm} = RT$ ), em regime elástico durante todo o ensaio. Além disto, a norma DNIT 031/2004-ES especifica que, para concretos asfálticos, o valor mínimo da RT é de 0,60 MPa.

Para avaliar o efeito da temperatura dos compósitos asfálticos similares as condições de campo, os ensaios realizaram-se nas temperaturas entre 25°C e 60°C, com variação de 5 em 5 graus. Nas Figuras 6 e 7 é mostrado o equipamento *Universal Testing Machine* (UTM), exemplificando o corpo de prova preparado para a realização do referido experimento.



Figura 6 – Prensa UTM e detalhe da célula de carga



Figura 7 – Equipamento UTM

- a) Câmara de temperatura; b) Prensa UTM; c) Central de controle e aquisição de dados; d) Interface computacional; e) Dispositivo de controle de pressão pneumática.

#### 4.7.2. Módulo de Resiliência

As primeiras pesquisas em pavimentação, que relacionam o surgimento de fissuras em revestimentos asfálticos frente às deformações recuperáveis, iniciaram-se em 1903 por Francis Hveem, tendo adotado o termo resiliência para definir a energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações.

Define-se o Módulo de Elasticidade ( $E$ ) como sendo a razão entre a tensão aplicada e a deformação imposta ao material, em um comportamento elástico linear. Neste parâmetro têm-se carregamentos de modo cíclico e a baixos níveis de tensão. Em misturas asfálticas, quando se transmite um carregamento, seguido de alívio, observa-se que nem toda deformação consegue se recuperar, persistindo uma parcela que não retorna ao estado inicial. Portanto, a resposta dos compósitos asfálticos a um carregamento depende, dentre outros fatores, da intensidade e velocidade de aplicação do esforço, além da temperatura, acarretando que tais materiais sejam melhores representados segundo os preceitos da Teoria da Visco-Elasticidade.

Admite-se utilizar, em misturas asfálticas e em ensaios de compressão diametral, a Teoria da Elasticidade, quando aplicadas tensões de tração em baixos níveis (40% ou menos da tensão de ruptura do ensaio de RT) e em temperaturas inferiores à 40°C (Medina e Motta, 2005). Nos materiais asfálticos, uma elevada parcela das deformações iniciais é permanente ou também chamada de deformação plástica, pois o material, ao cessar o carregamento, não retoma seu estado inicial, adquirindo uma deformação residual.

O experimento para determinar o MR no Brasil (DNER ME 133, 1994) consiste em submeter amostras cilíndricas a cargas de compressão diametral, induzindo no corpo de prova tensões de compressão (direção vertical) e de tração (direção horizontal). Transmite-se o

carregamento vertical por meio de um friso curvo e mede-se o deslocamento horizontal por meio de Linear Variable Differential Transducer (LVDT's).

Executaram-se os ensaios de MR a cargas correspondentes a 5, 10, 20 e 30% da carga de ruptura do ensaio de RT, no intervalo de temperaturas de 25 a 60°C, de 5 em 5 graus, para se analisar principalmente o comportamento das misturas asfálticas frente à variação de temperatura. A frequência foi de 1,0 Hz, com um tempo de aplicação de carga de 0,1 segundos e tempo de repouso de 0,9 segundos. A Figura 8 mostra exemplo da UTM com o corpo de prova preparado para a realização do ensaio de MR.

O Módulo de Resiliência é calculado como sendo a razão entre a tensão de tração ( $\sigma_t$ ), aplicada repetidamente no plano diametral vertical da amostra, e a deformação específica recuperável ( $\varepsilon_t$ ), correspondente à tensão submetida numa dada temperatura e para certa frequência de aplicação de carga, conforme a Equação 2.

$$MR = \frac{\sigma_t}{\varepsilon_t} \quad \text{Eq. 2}$$

De forma analítica, o MR é definido pela Equação 3:

$$MR = \frac{F(0,976\mu + 0,2692)}{\Delta H} \quad \text{Eq. 3}$$

$MR$  = Módulo de resiliência, em MPa;

$F$  = Carga vertical aplicada diametralmente no corpo-de-prova, em N;

$\Delta$  = Deslocamento recuperável ou resiliente registrado para 300, 400 e 500 aplicações de carga ( $F$ ), em mm;

$H$  = Altura do corpo-de-prova, em mm.

$\mu$  = Coeficiente de Poisson.

Nas misturas asfálticas o coeficiente de Poisson ( $\mu$ ) pode ser considerado independente do tipo de carregamento, variando apenas em função da temperatura. O seu

valor varia entre 0,35 (baixas temperaturas) até 0,50 (altas temperaturas). No Brasil é comum assumir o valor de 0,30. Neste projeto adotar-se-ão os valores para ( $\mu$ ) conforme Tabela 5.

Temperatura	25 a 40 °C	45 °C	50 °C	55 °C	60 °C
Coefficiente de Poisson ( $\mu$ )	0,30	0,33	0,35	0,38	0,40

Tabela 5 – Valores para o Coeficiente de Poisson em função da temperatura

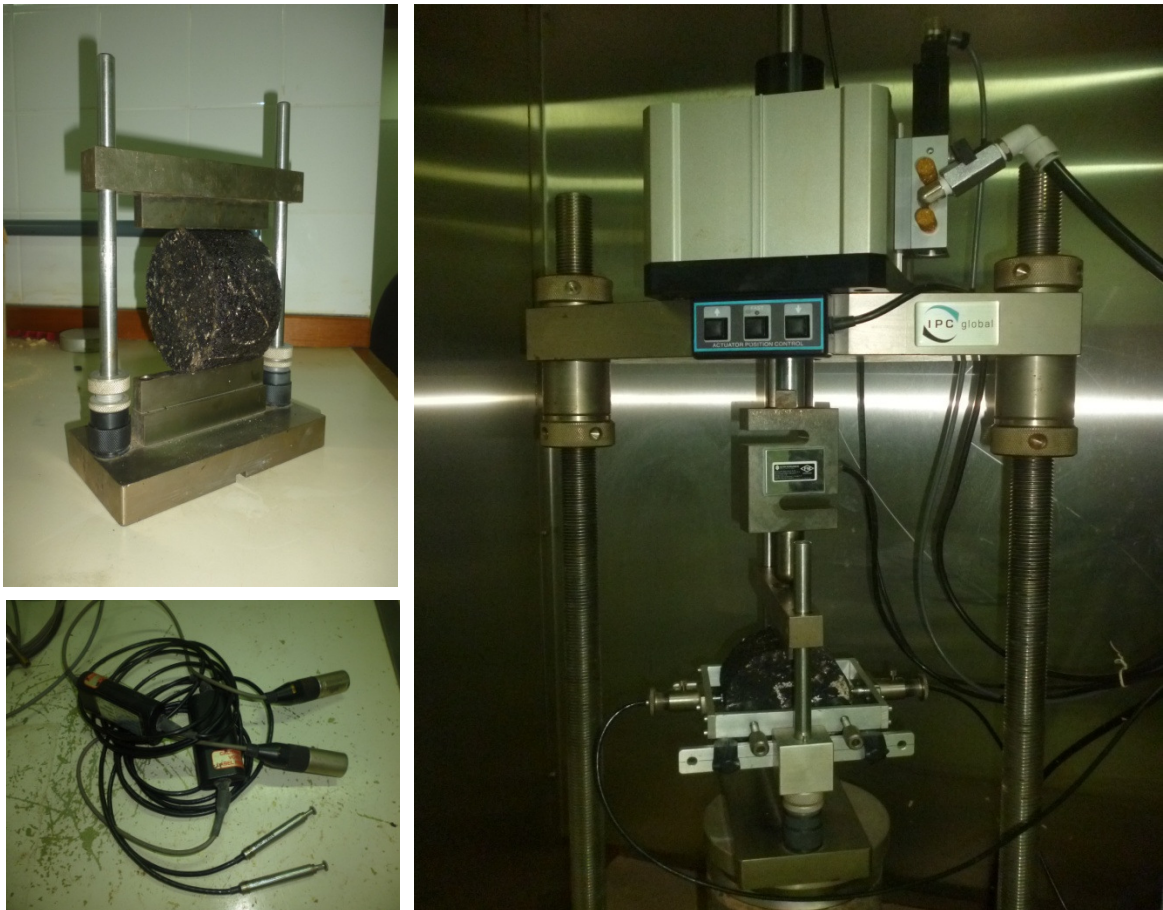


Figura 8 – Preparação do corpo de prova para o ensaio de MR

#### 4.7.3. Vida de Fadiga

Define-se a fadiga como um processo que ocasiona alterações progressivas estruturais, de forma localizada e permanente, ocorrendo em materiais sujeitos a tensões e deformações repetidas. Culminar em trincas ou na ruptura completa do compósito após um determinado número de repetições. Ou seja, ocorre a perda de resistência do material em função de ter sido solicitado repetidamente, com aplicação de esforços de tração ou de flexão, ao longo de sua vida útil.

O aparecimento de patologia decorrente de fadiga é percebido com o trincamento na superfície do revestimento asfáltico, causado, principalmente, pela aplicação repetida de cargas pesadas, e que têm a contribuição de camadas de pavimento mal projetadas e/ou executadas, as quais se tornam propensas a altas deflexões quando carregadas. Somado aos fatos descritos, essa é uma patologia provocada por um problema de comportamento não-linear, ocorrendo em diversos tipos de materiais, e tem como característica o fato de o dano ocasionado no primeiro ciclo ser diverso daqueles relativos aos sucessivos ciclos.

Segundo Medina e Motta (2005), a Vida de Fadiga, em misturas asfálticas, consiste, em termos de vida de fratura, ao número total de aplicações de certa carga necessária à fratura completa da amostra. Em relação à vida de serviço, corresponde ao número total de aplicações de uma carga que reduz o desempenho ou a rigidez inicial da amostra. Para realização de ensaios, sugerem a porcentagem no nível de tensão entre 10 e 50% respeitante à carga de ruptura no ensaio de RT.

Tradicionalmente no Brasil o ensaio laboratorial de Vida de Fadiga visa definir o número de repetições de carga, sendo realizado por compressão diametral à tensão constante (TC). A carga é aplicada até o rompimento do corpo-de-prova segundo duas formas: a) à tensão controlada, cujo critério de fadiga está associado à fratura da amostra. A solicitação é mantida constante ao longo do ensaio e as deformações atingem um valor máximo até o estágio de colapso do corpo-de-prova. Portanto, a Vida de Fadiga (N) é definida como o número total de aplicações de uma carga necessária à fratura completa da amostra (Pinto e Preussler, 2002); b) à deformação controlada, o critério de fadiga não está condicionado à ruptura completa do corpo-de-prova. Para que a deformação seja mantida constante durante o experimento é necessário que haja uma diminuição do carregamento aplicado. Então, neste caso a Vida de Fadiga (N), será o número de repetições da carga capaz de reduzir o desempenho ou rigidez inicial da amostra a um nível pré-estabelecido. O final do ensaio pode

ser determinado quando ocorrer uma redução da ordem de 50% do módulo de rigidez ou de resiliência.

O ensaio à tensão controlada caracteriza melhor os pavimentos com revestimento asfáltico mais espessos, uma vez que há predominância de absorção das tensões pelo revestimento em detrimento das camadas mais inferiores do pavimento. Diversamente, o experimento com deformação controlada corresponde melhor a pavimentos de revestimento mais delgados, em que há maior contribuição das subcamadas do pavimento na assimilação das tensões solicitantes.

Os ensaios em pauta de Vida de Fadiga foram realizados: a) nas temperaturas de 25, 30, 40, 50 e 60°C; b) com níveis de tensão controlada de 30, 40 e 50% da tensão de ruptura do ensaio de RT; e c) com frequência de carga igual a 1 Hz, tempo de aplicação de carga de 0,1 segundos e tempo de repouso de 0,9 segundos. Determinou-se a Vida de Fadiga como o número total de aplicações (N) necessária à fratura completa da amostra. As tensões de tração horizontal ( $\sigma_t$ ) e de compressão vertical ( $\sigma_c$ ), no plano diametral vertical do corpo-de-prova, assim como a diferença entre elas ( $\Delta\sigma$ ), calcular-se-ão a partir das seguintes equações:

$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi DH} \quad \text{Eq. 4}$$

$$\sigma_c = -\frac{6F}{\pi DH} \quad \text{Eq. 5}$$

$$\Delta\sigma = \sigma_t - \sigma_c \quad \text{Eq. 6}$$

$\sigma_t$  = Tensão de tração horizontal, em MPa;

$\sigma_c$  = Tensão de compressão vertical, em MPa;

$F$  = Carga aplicada, em N;

$D$  = Diâmetro do corpo-de-prova, em mm;

$H$  = Altura do corpo-de-prova, em mm;

$\Delta\sigma$  = Diferença de tensões.

As curvas de Vida de Fadiga são, em geral, representadas em gráfico do tipo log-log, com números de solicitações de carga (N), que levam à ruptura do corpo de prova, nas ordenadas e as diferenças de tensões ( $\Delta\sigma$ ), que levaram à ruptura, nas abscissas.



## **5. RESULTADOS**

São apresentados à caracterização dos materiais (agregado miúdo, agregado graúdo, ligante asfáltico e fíler), e das misturas asfálticas, além da resposta desses compósitos, às diferentes temperaturas, quanto aos ensaios mecânicos de resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência e vida de fadiga.

### **5.1. Caracterização dos materiais**

#### **5.1.1. Amostra SUC**

Na Figura 9 é mostrada a curva granulométrica do solo referente à Amostra SUC. Nos percentuais das frações granulométricas que compõem este material se percebe a predominância das frações siltosa e argilosa, conforme a norma ABNT NBR 6502/1995, com um percentual de 92,0% de todo material passando pela peneira com abertura da malha igual a 0,075 mm. Portanto, atende a recomendação mínima de material fino para produção de ASAC estabelecido pelo DNIT igual a 85% de finos passando na citada peneira (Frota *et al.*, 2006b).

A Tabela 6 lista os índices de consistência da aludida amostra, que resultam na classificação A7-6, segundo o critério da American Association of State Highway and Transportation Oficial/Transportation Research Board (AASHTO/TRB), como argila siltosa (CL), de acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), e o Índice de Plasticidade (IP) de 26%. Particularmente, este valor atende o percentual maior que 15% para confecção de agregados calcinados, segundo o DNIT (Frota *et al.*, 2004a).

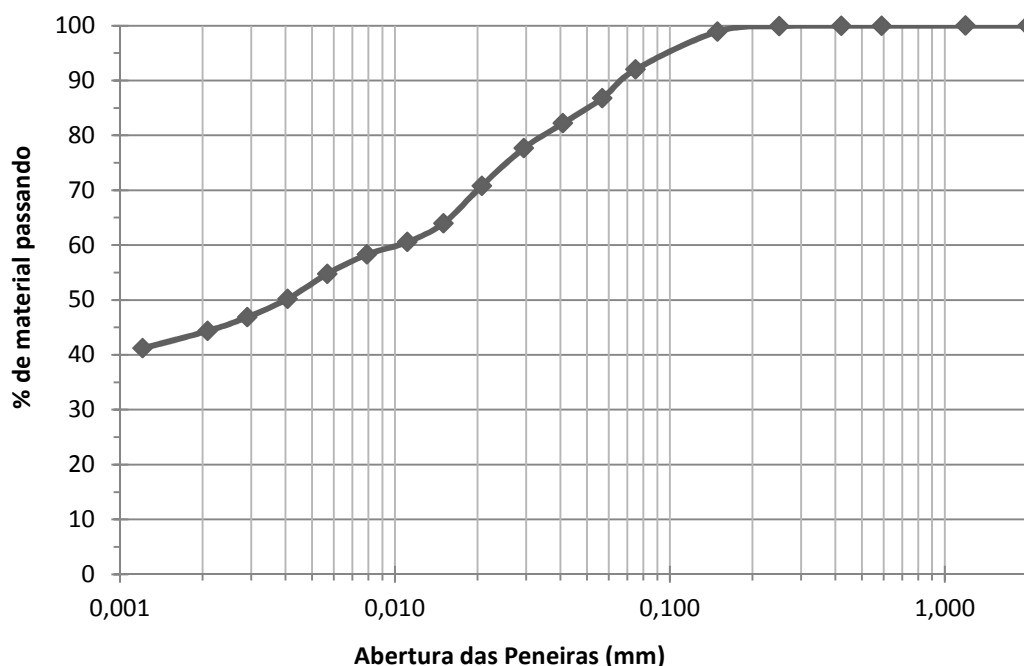


Figura 9 – Curva granulométrica da amostra SUC

Índice de Consistência	Resultado
Limite de Liquidez (LL)	48%
Limite de Plasticidade (LP)	22%
Índice de Plasticidade (IP)	26%
IP mínimo (Frota <i>et al.</i> ,2004a)	>15%

Tabela 6 - Índices de Consistência SUC

Quanto ao ensaio de autoclave (DNER-ME 223/1994), a Amostra SUC atendeu às particularizações do mencionado método, pelo fato de não ter variado o volume e a consistência, sendo indicada para produção de ASAC. O mesmo ocorreu no ensaio de perda de massa (DNER-ME 225/1994), cujo resultado mostrou valor de 1,87%.

Relativo ao ensaio de Abrasão “Los Angeles”, a norma DNER-EM 230/1994, que objetiva o emprego como agregado sinterizado de argila calcinada, limita valor máximo igual a 45%. Os resultados demonstraram um desgaste da ordem de 70%. Tal valor, a princípio, impediria o seu emprego para a confecção como agregado graúdo com vista a misturas asfálticas. Entretanto, trabalhos realizados pelo GEOTEC (Frota *et al.*, 2007; Silva, Cleudinei *et al.*, 2008a; Silva, Carmem *et al.*, 2009 e Cavalcante *et al.*, 2011b) evidenciaram que compostos com esse agregado de argila apresentaram resistência mecânica apreciável, com

menor potencial de desenvolver deformações permanentes, respeitante as tradicionais misturas com seixo, amplamente utilizados na construção dos pavimentos da Região Norte do país. Assim, deve-se avaliar a viabilidade de uso do ASAC, não apenas quanto ao desgaste, mas, sobretudo, sob o prisma do comportamento mecânico. Ressalta-se, ainda, pela citada norma que se admite, excepcionalmente, agregados graúdos com valores maiores a 45%, no caso de terem mostrados, comprovadamente, desempenho satisfatório em utilização anterior - caso em pauta.

### 5.1.2. Agregados graúdos (ASAC e Seixo)

A Figura 10 expõe a curva granulométrica e na Tabela 7 têm-se indicados os resultados dos ensaios de caracterização para os agregados graúdos (ASAC e seixo), participantes das misturas asfálticas do estudo em questão.

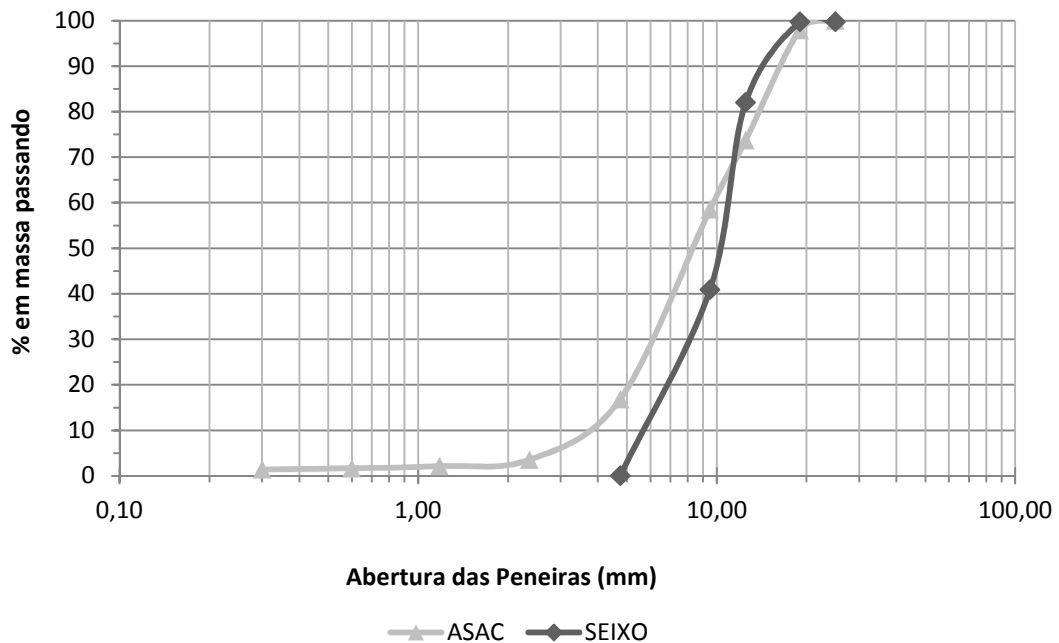


Figura 10 - Curva granulométrica dos agregados graúdos

Análise	Amostra	
	ASAC	Seixo rolado
Gsb(g/cm <sup>3</sup> )	1,855	2,626
Gsb ssd(g/cm <sup>3</sup> )	2,133	2,636
Gsa(g/cm <sup>3</sup> )	2,571	2,643
Absorption(%)	15,03	0,0
Luw (kg/m <sup>3</sup> )	1062,00	1894,60
Ruw (kg/m <sup>3</sup> )	1126,35	1906,32
Desgaste (%) Abrasão Los Angeles	70,00	37,00

Tabela 7 - Caracterização dos agregados graúdos

De acordo com a Figura 10 e dentro do que estabelece a NBR 6502/1995, tem-se que o material graúdo (ASAC e Seixo) mostra predominância média de suas frações, entre 6,0 e 20,0 mm. Ressalta-se que se modificou a textura do seixo, sendo eliminada a fração que passa na peneira de malha igual a 4,75 mm.

Pela Tabela 7 verifica-se, por se tratar de um agregado leve, que o ASAC mostrou massas específicas (Aparente, Solta e Compactada) inferiores aos respectivos valores geralmente encontrados para os materiais naturais. O agregado alternativo também indicou um alto potencial de absorção, igual a 15,03%, o que pode ocasionar uma maior porcentagem de ligante no compósito asfáltico, dada a considerável porosidade frente à mistura confeccionada com agregado aluvionar (Frota *et al.*, 2003, 2007; Cavalcante *et al.*, 2010, 2011b). Quanto ao desgaste por abrasão somente o seixo atendeu às especificações, enquanto o agregado ASAC mostrou, como comentado, valor em desacordo com o normativo.

### 5.1.3. Agregados miúdos e material de enchimento

A Figura 11 mostra as curvas granulométricas referentes aos agregados miúdos (Areia Mao, Areia Coari e Areia ASAC). Observar-se, pela NBR 6502/1995, que a areia de Manaus (Mao) contém predominância entre 0,2 e 0,6 mm (textura média); a Areia de Coari, apesar de possuir uma boa parcela de areia média, aproximadamente 40%, mostra a fração areia grossa como predominante, cerca de 43% retida entre 0,6 e 2,0 mm; e com respeito a areia artificial (Areia ASAC) sua fração areia grossa se sobressai sobre as demais, com um percentual

próximo dos 37%. Contudo, aproximadamente 35% do material ficou retido na peneira #2,00mm, sendo classificada como uma areia pedregulhosa.

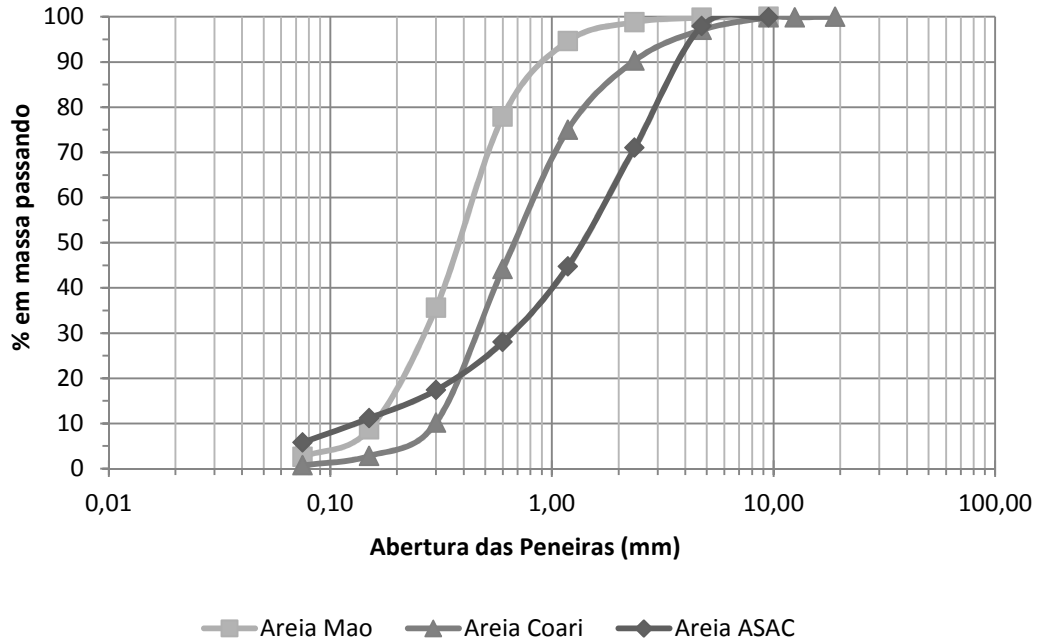


Figura 11 - Curvas granulométricas dos agregados miúdos

Na Tabela 8 constam os valores das massas específicas alusivas às areias Mao e Coari, que indicam correspondência a sua matéria-prima (quartzo). Em particular, a Areia de ASAC, por originar-se de matéria-prima argilosa, apontou seus resultados inferiores aos respectivos parâmetros respeitantes às areias naturais (Mao e Coari).

Amostra	Areia Mao	Areia Coari	Areia ASAC
Gsb (g/cm <sup>3</sup> )	2,632	2,627	1,790
Gsbssd (g/cm <sup>3</sup> )	2,692	2,706	2,167
Absorption (%)	0,0	0,0	18,96
Ruw (kg/m <sup>3</sup> )	1675,9	1782,2	1375,71

Tabela 8 - Caracterização dos agregados miúdos

Na Figura 12 consta a curva granulométrica do material de enchimento (cimento *portland*), tendo passado integralmente na peneira de malha igual a 0,075 mm. Logo, mostrou atender ao requisito da especificação para uso como fíler. Apresentou massa específica real igual a 3,15g/cm<sup>3</sup>.

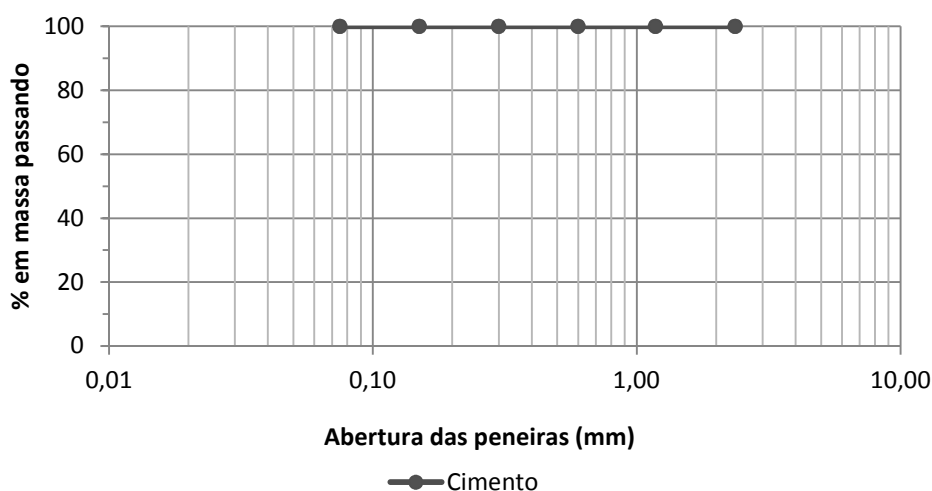


Figura 12 - Curva granulométrica do fíler

#### 5.1.4. Caracterização do ligante

Selecionou como ligante, o cimento asfáltico de petróleo amplamente empregado e comercializado em Manaus. Foi caracterizado (Tabela 9) seguindo as especificações estabelecidas pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), que por sua vez utiliza as normas da *American Society of Testing and Materials* (ASTM).

Características		Método	Especificação	Resultado	Unid.
Penetração		ASTM D 5	50 a 70	57	0,1mm
Ponto de Amolecimento		ASTM D36	46 mín	51,2	°C
Viscosidade Saybolt-Furol	135°C	ASTM E 102	141 mín	260	sSF
	150°C		50 mín	154,8	
	177°C		30 a 150	53,5	
Viscosidade Brookfield (SP21, 20rpm)	135°C	ASTM D 4402	274 mín	675	cP
	150°C		112 mín	334,7	
	177°C		57 a 285	128	
RTFOT	Penetração retida	ASTM D 5	55 mín	63,1	%
	Aumento do ponto de amolecimento	ASTM D 36	8 máx	8	°C
	Ductilidade a 25°C	ASTM D 113	20 mín	29	cm
	Varição em massa	ASTM D 2872	0,5 máx	0,04	%
Ductilidade a 25°C		ASTM D 113	60 mín	>100	cm
Solubilidade no tricloroetileno		ASTM D 2042	99,5 mín	99,5	%massa
Ponto de fulgor		ASTM D 92	235 mín	328	°C
Índice de susceptibilidade térmica		ASTM X 018	-1,5 a 0,7	-0,6	N/A
Densidade relativa a 24°C		ASTM D 70	Anotar	0,996	N/A
Aquecimento a 177°C		ASTM X 215	Sem espuma	Sem espuma	-

Legenda: N/A; não se aplica.

Tabela 9 - Ensaios tradicionais de caracterização do CAP 50/70

FONTE: Laboratório da Refinaria Isaac Sabbá (REMAN)

Segundo a Tabela 9, tem-se que: a) o ensaio de Penetração a 25°C obteve valor de  $57.10^{-1}$  mm, por conseguinte, atendeu ao intervalo de classificação como CAP 50/70; b) este tipo de ligante é detentor de uma baixa viscosidade, mormente em relação à região manauense que possui clima com elevadas temperaturas. Característica esta que contribui para o aparecimento de patologias ao longo do revestimento local; c) o valor da temperatura de 51,2°C, referente ao Ponto de Amolecimento, encontra-se dentro do padrão; d) os valores determinados para a Viscosidade Saybolt-Furol e Brookfield mostraram-se de acordo com os limites especificados; e) a baixa quantidade de impurezas, 0,04% de perda de massa, apresentou-se de acordo com a especificação de solubilidade em ensaio com tricloroetileno (mínimo de 99,5%); f) a Ductilidade a 25°C variou de superior a 100 cm, como material virgem, para 29 cm quando envelhecido. Logo, sugere perda de potencial elástico, com consequente aumento da fase plástica; e g) os ensaios que tratam da segurança ao manuseio do ligante seguem a ANP. Destaca-se que não houve formação de espuma durante o aquecimento a 177°C, atingindo a temperatura de 328°C no ensaio do Ponto de Fulgor, valor referente à temperatura mínima.

Em linhas gerais, o ligante do tipo cimento asfáltico de petróleo, partícipe dos compósitos asfálticos estudados, atendeu aos requisitos técnicos especificados pela ANP, ou seja, foi classificado como CAP 50/70.

## **5.2. Caracterização da mistura asfáltica do tipo Cimento Asfáltico (CA)**

Visando as composições minerais, empregou-se o Método de Bailey de seleção granulométrica, além do enquadramento da textura na Faixa Superpave com DMN de 19,0mm. Nota-se, pela Figura 13, que todas as misturas, conforme recomendado, passaram além da Zona de Restrição (ZR) e entre os Pontos de Controles (PC). Segundo o gráfico da Figura 14, a mistura asfáltica com seixo é considerada como fina (acima da Zona de Restrição) e o compósito com ASAC como grossa (abaixo da Zona de Restrição).

Componentes	Mistura asfálticas	
	ASAC	Seixo
ASAC	74,25%	-
Seixo	-	67,20%
Areia ASAC	14,03%	-
Areia Coari	10,32%	-
Areia Mao	-	29,70%
Cimento <i>portland</i>	1,40%	3,10%

Tabela 10 - Composição das misturas do Tipo CA

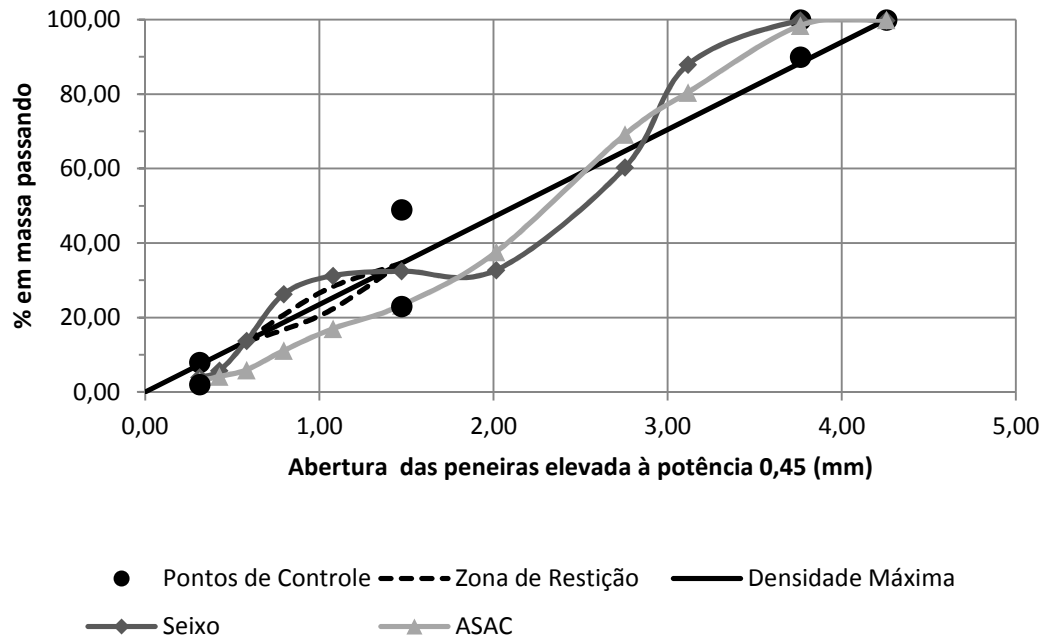


Figura 13 - Curvas granulométricas das misturas (CA/Seixo e CA/ASAC)

Observa-se na Figura 14 para as misturas com ASAC que os valores para T1, T2, T3 e T4, foram 9,68%, 8,56%, 9,13% e 9,74%, respectivamente. Pela média aritmética dos dois valores centrais (T1 e T3), definiu-se o teor de projeto “T”, que, neste caso, resultou em 9,40%. Pela Figura 15, que corresponde aos teores de projeto para misturas asfálticas com seixo, têm-se os valores 5,16% (T1), 3,88% (T2), 3,99% (T3) e 4,95% (T4). Segundo a média aritmética dos dois valores centrais (T3 e T4), determinou-se o teor de projeto “T” igual a 4,5%. Confrontando os dois teores de projeto encontrados, ressalta-se que o menor valor para a mistura com seixo relativo ao compósito com ASAC, deve-se ao fato deste agregado alternativo mostrar um alto índice de absorção.



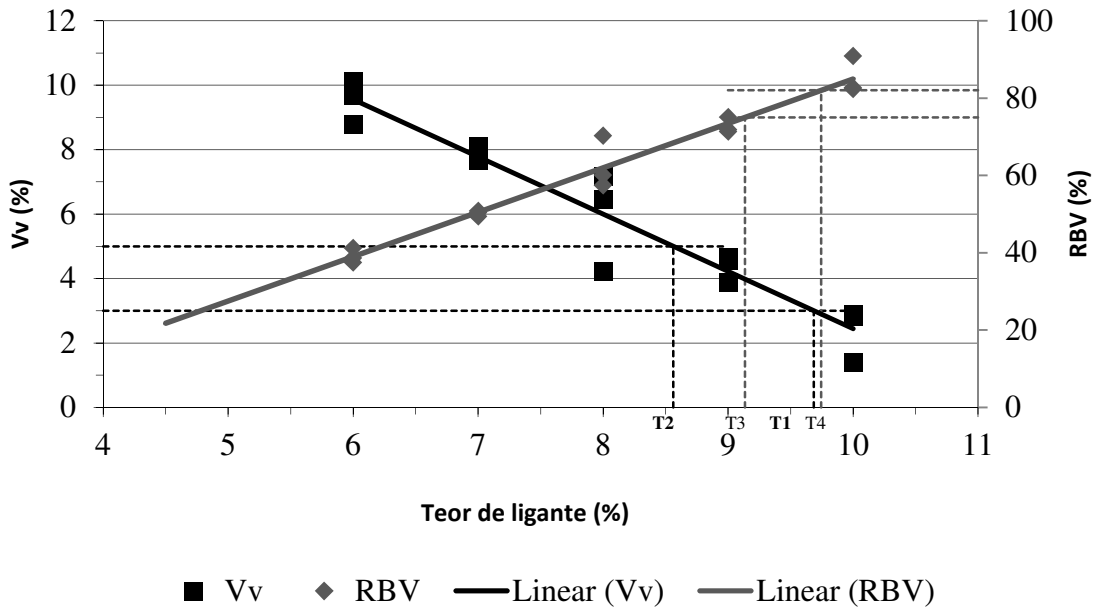


Figura 14 - Teor de projeto da mistura com ASAC

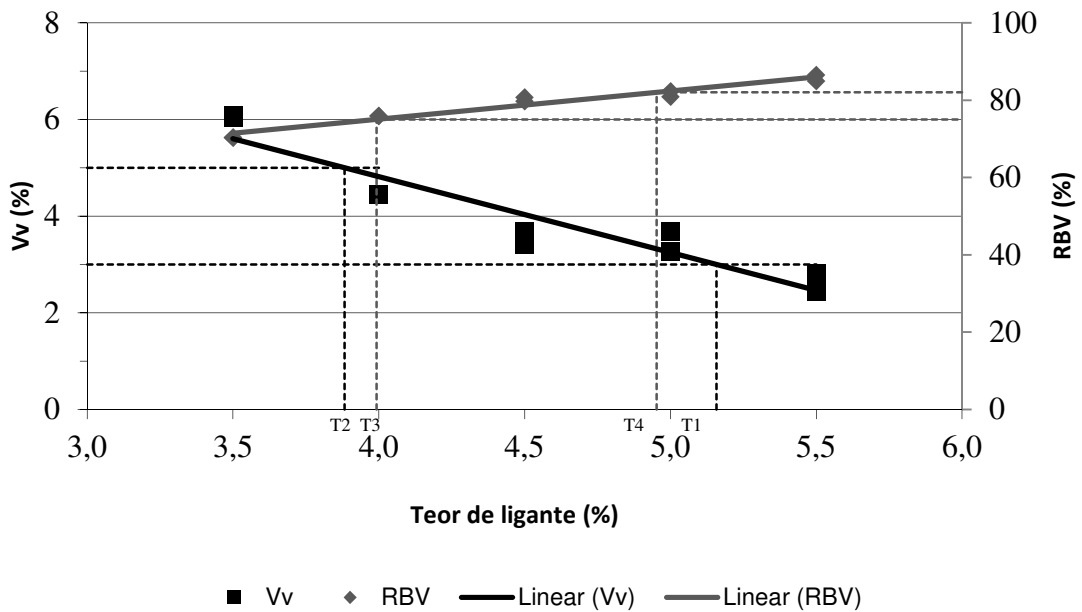


Figura 15 - Teor de projeto da mistura com Seixo

### 5.3. Caracterização Mecânica

#### 5.3.1. Resistência à Tração

A Figura 16 exibe a resistência à tração por compressão diametral quando submetidas a diferentes temperaturas. Observa-se claramente a influência desse parâmetro na condição de campo (serviço) relativo às propriedades mecânicas. No caso da mistura confeccionada com o

seixo, esta indicou maior valor a temperaturas até 40°C, quando, então, começa a perder resistência devido à falta de aderência de suas partículas, de superfície polida, com o ligante aquecido. Para as misturas com ASAC, têm-se altos valores da RT, que são mantidos a altas temperaturas pelo maior atrito interno entre suas partículas.

Igualmente pela mesma Figura 16, é possível notar que a temperatura de 25°C, as misturas indicam resistência maior que 0,65 MPa, como recomenda a especificação brasileira para concretos asfálticos (DNIT 031/2004-ES). Ressalta-se, ainda, que as resistências mostram uma maior variação até próximo da faixa de 40°C a 45°C. Em temperaturas maiores o ligante asfáltico se apresenta tão viscoso que não desempenha mais satisfatoriamente a função de unir os agregados. Os acréscimos na temperatura, a partir de 45°C, não acarretam grandes variações na RT, que ainda continua reduzindo, porém, de maneira bem mais branda. A exceção acontece com a mistura com seixo que varia com certa uniformidade, à medida que acresce a temperatura.

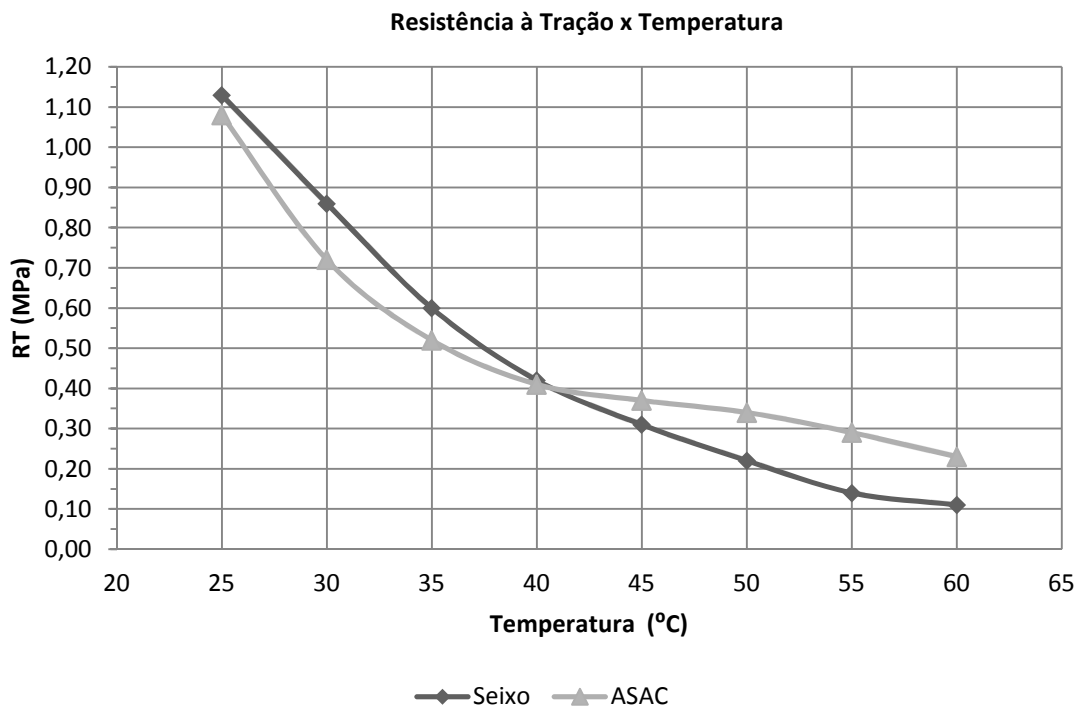


Figura 16 - Resistência à tração x Temperatura

### 5.3.2. Módulo de Resiliência

As Figuras 17 e 18 mostram os Módulos de Resiliência das misturas a um intervalo de temperaturas de 25 a 60°C, com variação intermediária de 5 em 5°C, e calculados a partir da aplicação de diferentes níveis de tensão. Pela teoria para as misturas asfálticas, o Módulo de Resiliência deve permanecer estável com a variação de tensões, dentro do limite elástico, e variar com a temperatura de ensaio.

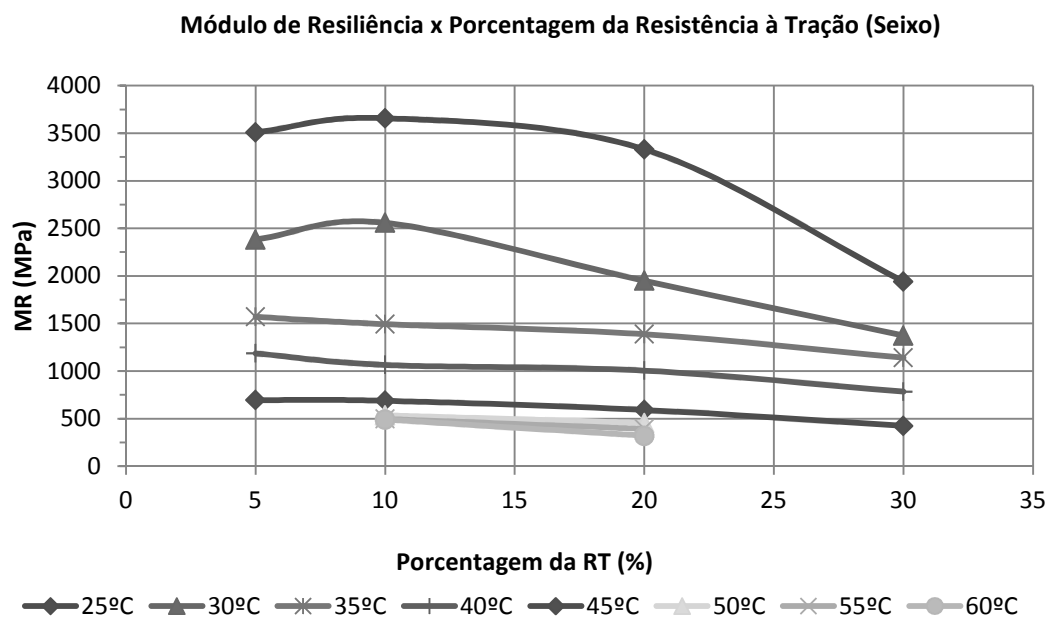


Figura 17 - Módulo de Resiliência da Mistura com Seixo

A Mistura composta com Seixo mostrou-se bastante suscetível a ação da temperatura, como se observa na Figura 17, e comprovado pelo ensaio de Resistência à Tração. Nota-se ainda que o Módulo de Resiliência exibe uma sensível variação com o nível de tensão aplicada em menores temperaturas (25°C e 30°C). Referente à temperatura de 25°C o MR indica certa constância, em torno de 3.500 MPa, correspondente a tensões iguais a 5%, 10% e 20% da RT. Porém, o aumento da carga para 30% da RT causa uma considerável diminuição do MR de aproximadamente 2.000 MPa, sugerindo que sob esse nível de tensão essa mistura não se encontra mais dentro do regime elástico. Para a temperatura de 30°C e tensões até 20%

da RT, tem-se o MR em torno de 2.500 MPa. De 35°C em diante e para uma sensível redução (10% a 20%) da RT resultam módulos com discretas variações.

Houve a impossibilidade de ensaiar esta mistura com tensões correspondentes a 5% da RT a partir de 50°C, devido aos pequenos valores de carga serem menores que o fundo de escala do equipamento (100N). Para as tensões correspondentes a 30% da RT e nessas temperaturas, ocasionaram-se grandes deformações, visíveis a olho nu, antes mesmo do término da fase de condicionamento.

Em resumo, o Módulo de Resiliência dos compósitos com material aluvionar apresentou grandes variações entre 25°C a 35°C, uma menor diferença na faixa de 35°C a 45°C, e praticamente não alterou de 45°C a 60°C, permanecendo com valor em torno de 500 MPa para este último intervalo de temperaturas.

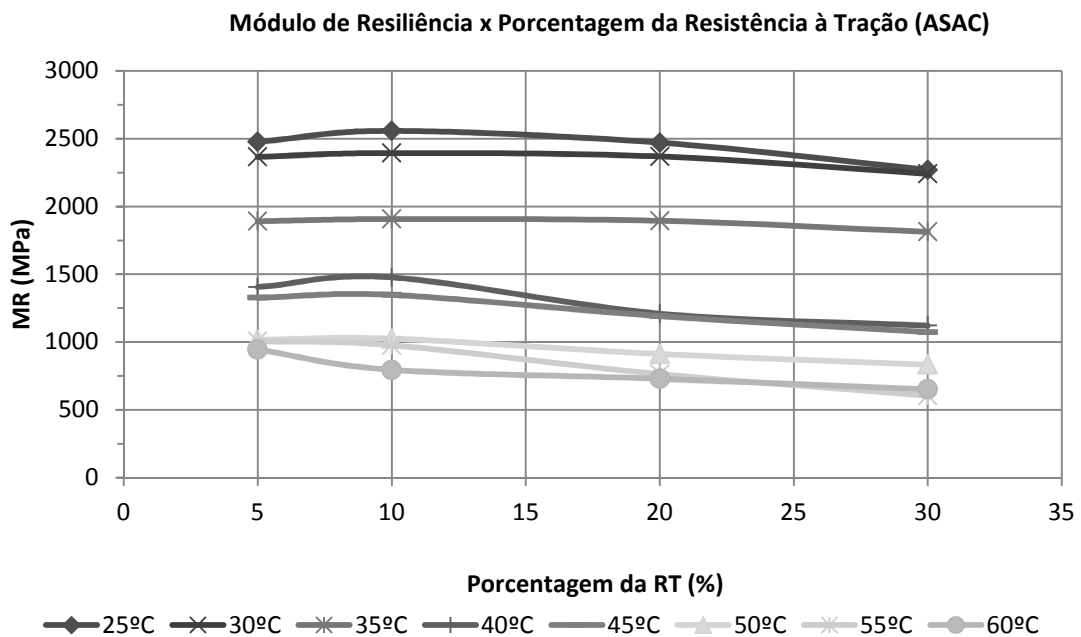


Figura 18 - Módulo de Resiliência da Mistura com ASAC

Pela Figura 18, tem-se que a Mistura com ASAC expõe o MR praticamente constante para diferentes tensões e nas diversas temperaturas, concluindo-se que o compósito é pouco suscetível à variação de temperatura. Este tipo de mistura indica, como as outras, perda em suas propriedades, à medida que aumenta a temperatura. Mas, é o compósito que se mantém

mais resistente quando tal acréscimo ocorre. O MR apresenta variações intermediárias a temperaturas entre 25°C a 50°C, e praticamente não altera para a faixa de 50°C a 60°C.

Na quase totalidade das misturas ensaiadas, seja com ASAC ou seixo, e para o intervalo de temperaturas especificadas, nota-se, pelas Figuras 17 e 18, que níveis muito pequenos de tensões, como 5% da RT, resultam em valores de MR diferenciados daqueles obtidos com tensões maiores, mesmo obedecendo ao regime elástico. Sendo assim, como recomendado pela norma DNER ME 133 (1994), adotou-se o menor valor de carga capaz de gerar registros mensuráveis para a determinação do Módulo de Resiliência, ou seja, a carga geradora de tensões em torno de 10% da RT. Deve ser lembrado que esta tensão mostrou sempre boas leituras para todas as misturas e em todas as temperaturas pesquisadas.

Resumem-se na Figura 19 os dados referentes às figuras anteriores (17 e 18). Observa-se que, em geral, a partir de 30°C os compósitos com ASAC expõem os maiores valores do MR comparadas às misturas com o material aluvionar. Também, como nos resultados para Resistência à Tração, a partir de 45°C, o Módulo de Resiliência varia de forma discreta, sendo provável que a essas temperaturas as propriedades viscosas do ligante passam a comandar o comportamento das misturas, deixando-as fora do regime elástico.

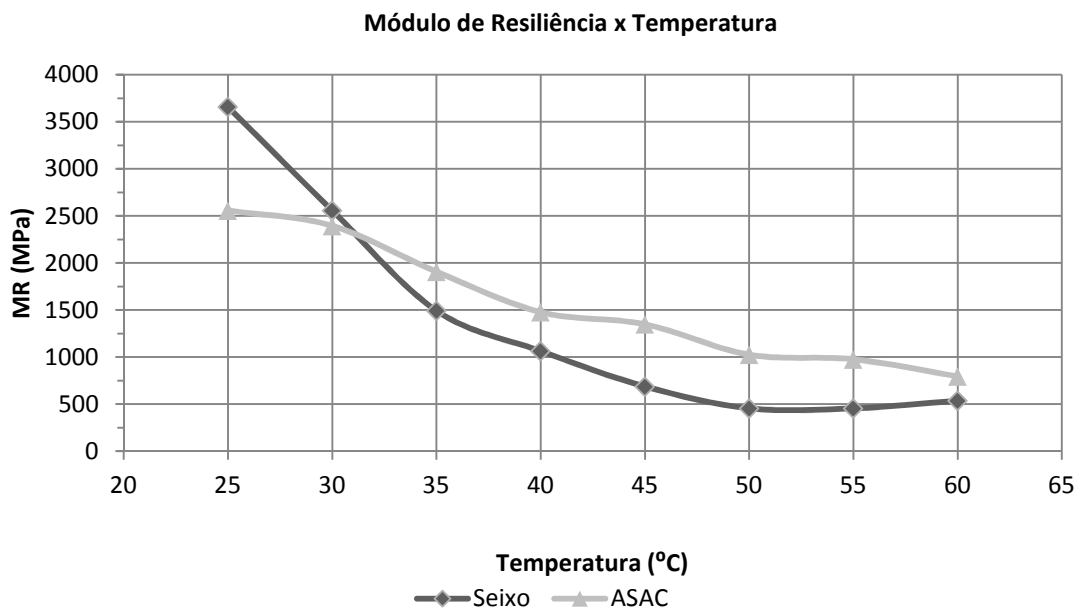


Figura 19 - Módulo de Resiliência x Temperatura das misturas com Seixo e ASAC

### 5.3.3. Vida de Fadiga

Por meio de um Fator Laboratório-Campo (FLC) é possível relacionar o número “N”, obtido a partir do tráfego previsto em projeto rodoviário, com o “N” determinado no ensaio de Vida de Fadiga. Contudo, pelas dificuldades de simular as condições reais do campo nos experimentos laboratoriais e no cálculo das tensões geradas nos corpos de prova, é comum utilizar o resultado dos experimentos apenas para comparação entre as misturas.

As Figuras 20 e 21 mostram as Curvas de Vida de Fadiga das misturas submetidas a diferentes temperaturas. Nota-se, para todas as compósitos, que conforme a temperatura vai aumentando é necessário um menor número de repetições de carga para que ocorra a ruptura, sob um determinado nível de tensão. À temperatura de 60°C, tem-se que a Vida de Fadiga não segue a tendência daquelas verificadas em temperatura inferiores. Essa diferença se deve a perda das propriedades elásticas das misturas a altas temperaturas. Também, pode-se afirmar que para os níveis de tensão estudados, em geral, a Mistura com ASAC indicou maior resistência à Fadiga em todas as temperaturas, atinente a Mistura com Seixo.

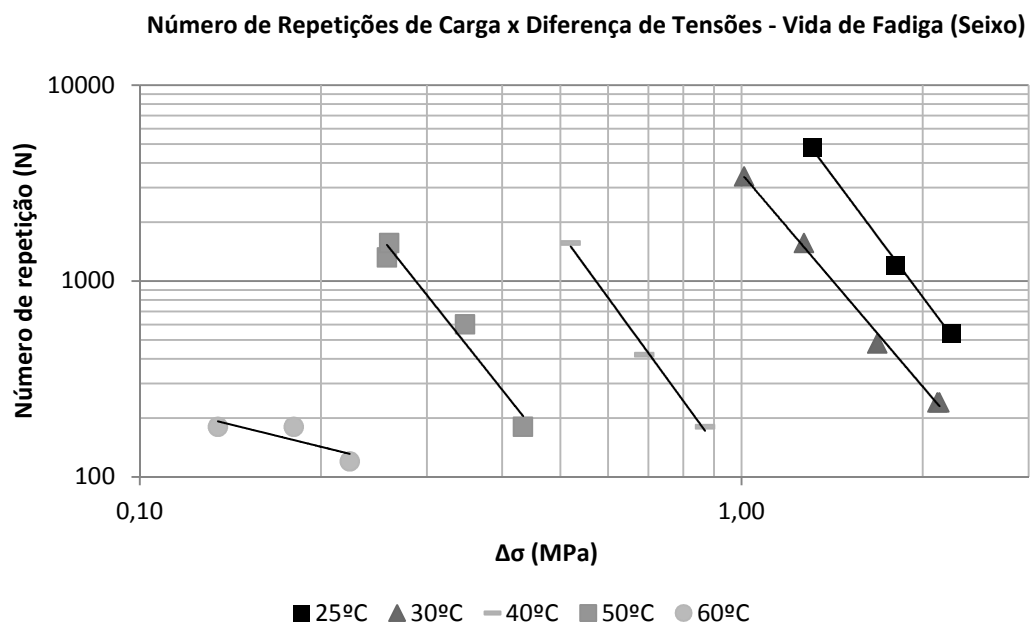
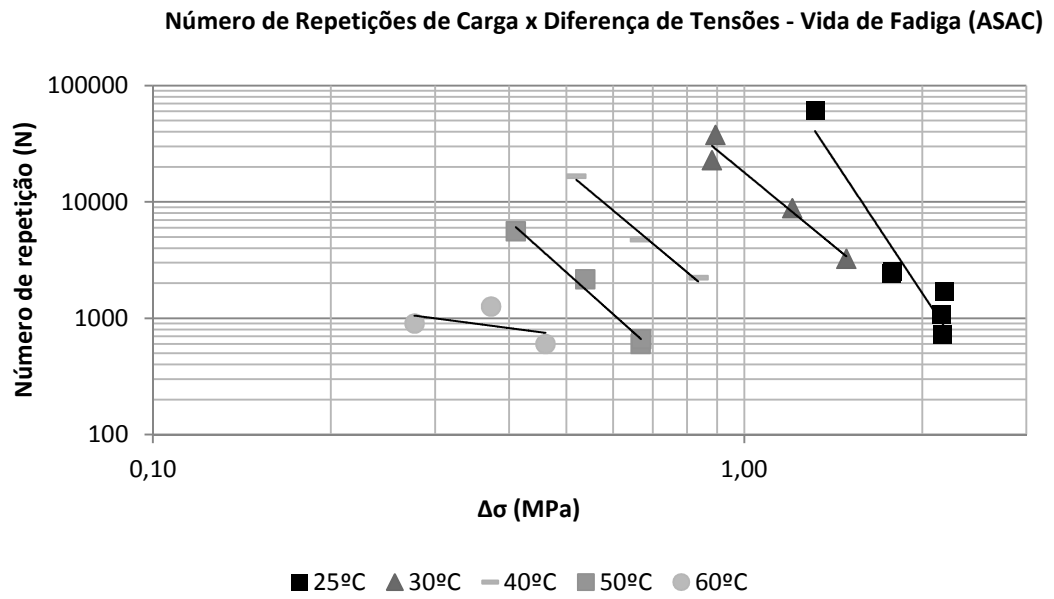


Figura 20 - Vida de Fadiga para a Mistura Seixo



## 6. CONCLUSÕES

Ao longo de todo o presente trabalho, se discutiu a utilização do agregado sinterizado de argila calcinada (ASAC) como substitutivo ao material usualmente empregado (seixo), na condição de agregado graúdo em concreto asfáltico, como forma de enfrentar à escassez de material pétreo, característica intrínseca da região.

Conforme pesquisa realizada por meio da Revisão Bibliográfica, além de diversos trabalhos sobre o tema presentes na literatura, o GEOTEC tem buscado apresentar, por meio de diversos estudos, o uso do ASAC em misturas asfálticas, como forma de permitir a difusão e ampliação do conhecimento deste material, além de contribuir para sua utilização em escala comercial.

A seguir, são sumarizadas as principais conclusões a respeito do presente estudo.

### 6.1. Caracterização dos materiais

- a) Em relação à Amostra SUC, predomina a fração argilosa, índice de plasticidade (IP) de 26%, e quanto ensaio de autoclave atendeu ao método;
- b) A granulometria dos agregados graúdos (ASAC e Seixo) mostrou predominância média de suas frações. Em relação ao agregado miúdo, a textura indicou predominância média referente à areia Mao, e grossa para as areias de Coari e alternativa (ASAC);
- c) Pelo ensaio de Abrasão “Los Angeles” o desgaste do agregado ASAC foi de 70% e para o seixo 37%;
- d) O agregado alternativo apresentou uma absorção de 15,03%, sendo nula para o seixo;
- e) O ligante asfáltico foi classificado como Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 50/70;
- f) O cimento portland passou 100% na peneira de malha 0,075 mm, com uma massa específica real igual a 3,15g/cm<sup>3</sup>.



## **6.2. Caracterização da mistura asfáltica tipo Cimento Asfáltico (CA)**

- a) A composição das misturas asfálticas do tipo CA empregou o Método de Bailey, sendo enquadradas na Faixa Superpave com DMN de 19,0 mm;
- b) Para a mistura com ASAC, o teor de projeto “T” foi de 9,40%, enquanto para o compósito com seixo determinou-se em 4,50%.

## **6.3. Ensaio Mecânicos**

- a) As propriedades mecânicas das misturas asfálticas mostraram grande influência da temperatura de serviço alusivo à Resistência à tração, Módulo de Resiliência e Vida de Fadiga. Em temperaturas abaixo de 40°C a 45°C ocorreram as maiores variações;
- b) Os valores da Resistência à Tração, para ambas as misturas asfálticas, foram maiores que 0,65 MPa, atendeu, assim, a norma para os concretos asfálticos;
- c) São recomendadas para o cálculo do Módulo de Resiliência cargas que gerem tensões entre 10% e 20% da RT, uma vez que apresentam boa leitura das deformações e permanecem dentro do regime elástico;
- d) Nos resultados de MR, percebe-se que até os 30°C, a mistura asfáltica com seixo indicou os melhores resultados, porém em temperaturas superiores o compósito com ASAC superou os valores de MR para todas as faixas de temperatura;
- e) Nos resultados de Vida de Fadiga, à medida que a temperatura cresceu observou-se um menor número de repetições de carga;
- f) Para todas as faixas de temperatura, no ensaio de Vida de Fadiga, o número de repetições de carga para rompimento da amostra contendo ASAC se mostrou superior confrontada à mistura com seixo, portanto, um melhor desempenho mecânico;
- g) A Mistura com ASAC apresentou: os melhores resultados quanto a Resistência à Tração, mantendo-se em elevadas temperaturas; constância no Módulo de Resiliência com o aumento de cargas, o que sugere a permanência no estado elástico, mesmo

sendo submetida a altas temperaturas; e superior resistência à Fadiga, para todas as faixas de temperaturas ensaiadas.

Pelo exposto, os resultados dos ensaios mecânicos evidenciam desempenho satisfatório das misturas asfálticas com ASAC comparadas aos compósitos com seixo. Tal conclusão contribui para ratificar a utilização do agregado sinterizado como alternativa técnica, notadamente quando analisado em altas temperaturas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Association of State Highway and Transportation Officials. “AASHTO T 19-93: Standard Test Method for Unit Weight and Voids in Aggregate.” USA, 1997.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. “NBR 6459: Solo: Determinação do limite de liquidez.” Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. “NBR 7180: Solo: Determinação do limite de plasticidade.” Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. “NBR 7181 - Solo: Análise granulométrica.” Rio de Janeiro, 1984.

American Society for Testing and Materials. “ASTM C 127-88: Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate.” *American Society for Testing and Materials*. Philadelphia, Pennsylvania, 1988.

\_\_\_\_\_. “ASTM C 128-93: Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate.” *American Association of State Highway and Transportation Officials*. Philadelphia, Pennsylvania, 1993.

\_\_\_\_\_. “C 131-96: Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine.” *American Association of State Highway and Transportation Officials*. Philadelphia, Pennsylvania, 1995.

\_\_\_\_\_. “C 136-95: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates.” *American Association of State Highway and Transportation Officials*. Philadelphia, Pennsylvania, 1995.

\_\_\_\_\_. “D 2041-00: Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures.” *American Association of State Highway and Transportation Officials*. Philadelphia, Pennsylvania, 2000.

Associação Brasileira de Cimento Portland. “Guia básico de utilização do cimento Portland.” 7. ed. São Paulo, 2002. 28p. Disponível em: <[http://www.abcp.org.br/conteudo/wp-content/uploads/2009/12/BT106\\_2003.pdf](http://www.abcp.org.br/conteudo/wp-content/uploads/2009/12/BT106_2003.pdf)>. Acesso em: 02 mar. 2014. (BT-106)

Batista, F. G. S. “Caracterização física e mecânica dos agregados de argila calcinada produzidos com solos finos da BR-163/PA.” Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia - IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.

Batista, F. G. S.; Lopes, L. A. S.; Vieira, A. “Produção e caracterização de agregados artificiais de argila calcinada para uso em pavimentação rodoviária.” In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, XVIII., 2004, Florianópolis. Anais... Florianópolis: ANPET, 2004. p. 270-281.

Bento, A. H. e Frota, C. A.. “Mapeamento Geotécnico da Área Urbana de Manaus - AM.” In: Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica, 3º., 1998, Florianópolis. Anais... Florianópolis: ABGE, 1998.

Cabral, G. L. L. “Utilização do agregado artificial de argila calcinada em obras de pavimentação e aperfeiçoamento da tecnologia” Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2011.

Cabral, G. L. L. “Metodologia de produção e emprego de agregados de argila calcinada para pavimentação” Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia - IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.

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

Cavalcante, D. G., *et al.* “Comportamento de misturas asfálticas confeccionadas com agregados sinterizados de argila calcinada para a construção de pavimentos na Amazônia” In: Congresso de Infraestrutura de Transportes, 5º., 2011b, São Paulo. Anais... São Paulo: ANDIT, 2011b. ISSN 1983-3903 05-027.

Cavalcante, D. G., *et al.* “Estudo da resistência à tração de misturas asfálticas utilizando ligante modificado com SBS e agregados sinterizados de argila calcinada para construção das vias urbanas de Manaus-AM” In: Congresso de Infraestrutura de Transportes, 4º., 2010, São Paulo. Anais... São Paulo: ANDIT, 2010. ISSN 1983-3903 04-037.

CETEM - CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL. “Avaliação da utilização de argila calcinada em pavimentação asfáltica.” Rio de Janeiro, 2007. 42p. Disponível em: <<http://www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2007-129-00.pdf>>. Acesso em: 04 mar 2014. (Série Tecnologia Mineral)

Cunha, M. B. “Comportamento de misturas asfálticas a quente com agregados provenientes de jazidas de seixo no Estado do Pará.” Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, SP, Brasil, 2004.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. “DNER ME 043/95: Misturas betuminosas a quente - Ensaio Marshall.” Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. “EM 230/94: Agregados Sintéticos Graúdos de Argila Calcinada.” Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. “EM 367/97: Material de enchimento para misturas betuminosas.” Rio de Janeiro, 1997.

\_\_\_\_\_. “ME 004/94: Material Betuminoso: determinação da viscosidade Saybolt-Furol a alta temperatura método da película delgada.” Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. “ME 085/94: Material finamente pulverizado: Determinação da massa específica real.” Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. “ME 133/94: Misturas betuminosas: Determinação do módulo de resiliência.” Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. “ME 222/94: Agregado sintético fabricado com argila: Desgaste por Abrasão.” Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. “ME 223/94: Argilas para a fabricação de agregados sintéticos de argila calcinada: Seleção expedita pelo Processo de Fervura.” Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. “ME 225/94: Agregado sintético de argila calcinada: Determinação da Perda de Massa após Fervura.” Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. “ME 138/94: Misturas betuminosas - determinação da resistência à tração.” Rio de Janeiro, 1994.

Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. “DNIT ES 031/2004: Pavimentos Flexíveis - Concreto Asfáltico - Especificação de Serviço.” Rio de Janeiro, 2004.

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral. “Anuário Mineral Brasileiro 2010.” 14p. Disponível em : <[http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriaDocumento/AMB2010/AM\\_2010.pdf](http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriaDocumento/AMB2010/AM_2010.pdf)>. Acesso em: 02 mar 2014. (UF-AM)

Frota, C. A.; Nunes, F. R. G.; Silva, C. L.; Melo, D. M.; Santos, M. G. R. “Desempenho mecânico de misturas asfálticas confeccionadas com agregados sintéticos de argila calcinada.” Revista Cerâmica, n. 53, 2007. p. 255-262.

Frota, C. A.; Silva, C. L.; Nunes, F. R. G. “Efeito do envelhecimento no comportamento mecânico de misturas asfálticas confeccionadas com agregado sintético.” In: Reunião Anual de Pavimentação, 36<sup>a.</sup>, 2005, Curitiba. Anais... Curitiba: ABPv, 2005.

Frota, C. A. *et al.* “Caracterização de solos para obtenção de agregados sintéticos de argila calcinada.” In: Reunião Anual de Pavimentação, 35<sup>a.</sup>, 2004a, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: ABPv, 2004a.

Frota, C. A.; Alencar, C. L. S.; Silva, C. P. L. “Influência do tipo de agregado na qualidade técnica de misturas asfálticas.” In: Reunião Anual de Pavimentação, 35<sup>a.</sup>, 2004b, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: ABPv, 2004b.

Frota, C. A.; Nunes, F. R. G.; Silva, C. L. “Estudo da Substituição do Seixo por Agregados Sintéticos de Argila Calcinada.” In: Reunião de Pavimentação Urbana, 12<sup>a.</sup>, 2003, Aracaju. Anais... Aracaju: ABPv, 2003.

Frota, C. A.; Silva, C. L.; Nunes, F. R. G. “Análise do comportamento mecânico de misturas asfálticas confeccionadas com agregados sintéticos de argila calcinada.” In: Jornadas Luso-Brasileiras de pavimentos: Políticas e Tecnologias, V., 2006a, Recife. Anais... Recife: V Jornadas Luso-Brasileiras de pavimentos: Políticas e Tecnologias, 2006a. Trabalho V-047.

Frota, C. A.; Silva, C. L.; Nunes, F. R. G. “Estudo da exploração de argila para fins de calcinação, visando a construção de pavimentos na província petrolífera de Urucu-AM-Brasil.” In: Jornadas Luso-Brasileiras de pavimentos: Políticas e Tecnologias, V., 2006b, Recife. Anais... Recife: V Jornadas Luso-Brasileiras de pavimentos: Políticas e Tecnologias, 2006b. Trabalho V-046.

HUANG, Y H. *Pavement analysis and design*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 1993.

IA - Instituto do Asfalto. Manual de Asfalto. Rio de Janeiro, 2001.

Marques, G. L. O. “Procedimentos de avaliação e caracterização de agregados minerais usados na pavimentação asfáltica.” Seminário de qualificação ao doutoramento – Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2001.

Medina, J.; Motta, L. M. G. “Mecânica dos Pavimentos.” 2 ed. Rio de Janeiro: Imagemaker Interactive, 2005. 570 p..

Melo, D. M. “Estudo do resíduo de construções e demolições oriundo do município de Manaus-AM em misturas asfálticas.” Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Amazonas - UFAM, Manaus, AM, Brasil, 2009.

MT – Ministério dos Transportes. Disponível em : <<http://www2.transportes.gov.br/bit/01-inicial/01-estadual/estados/port/am.htm>>. Acesso em: 02 mar 2014. (UF-AM)

Nascimento, R. R. “Utilização de agregados de argila calcinada em pavimentação; uma alternativa para o Estado do Acre.” Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.

Nunes, F. R. G. “Caracterização Mecânica de Misturas Asfálticas com Agregados Sintéticos de Argila Calcinada Quanto à Deformação Permanente.” Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará - UFC, Fortaleza, CE, Brasil, 2006.

Pinto, S.; Preussler, E. S. “Pavimentação rodoviária – conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis.” 2 ed. Rio de Janeiro: Copiarte, Copiadora e Artes Gráficas, 2002. 269 p..

Santos, M. G. R. “Estudo do Comportamento de Agregados Sintéticos de Argila Calcinada para Uso em Revestimentos Asfálticos para Manaus.” Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília - UnB, Brasília, DF, Brasil, 2007.

Santos, R. A. “Avaliação do emprego de agregado artificial de argila calcinada em pavimentação” Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia – IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

SHRP. “Superior Performance Asphalt Pavements (Superpave). The Product of SHRP Asphalt Research Program. Superpave Series N°. 2.” Strategic Highway Research Program. 1994b.

\_\_\_\_\_. “Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave): The Product of SHRP Asphalt Research Program. Superpave Series N°. 1.” Strategic Highway Research Program. 1994a.

Silva, A. C. L.; Frota, C. A. “Estudo da viabilidade econômica para produção de agregado sinterizado de argila calcinada.” Revista Cerâmica, nº 59, 2013. p. 508-517.

Silva, C. L., *et al.* “Evolução do processo produtivo na obtenção de agregados sintéticos de argila calcinada para a Região Amazônica.” In: Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos: Desenvolvimento e Responsabilidade Social, VII., 2008a, São Paulo. Anais... São Paulo: VII Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos: Desenvolvimento e Responsabilidade Social, 2008a. Trabalho VII- 026.

Silva, C. L.; Nunes, F. R. G.; Frota, C. A. “Obtenção do módulo dinâmico de misturas asfálticas com agregados sintéticos de argila calcinada (ASAC).” In: Reunião de Pavimentação Urbana, 15ª., 2008a, Salvador. Anais... Salvador: ABPv, 2008b. p. 269-282. Trabalho nº 37.

Silva, C. L. A. *et al.* “Processo produtivo de agregados sinterizados de argila calcinada para a região Amazônica.” *Revista Estudos Tecnológicos*, Vol. 5, nº 3, 2009. p. 374-388.

Silva, L. C. P., *et al.* “Estudo mecânico por meio do módulo de resiliência de misturas asfálticas confeccionadas com seixo, brita e ligante modificado com SBS aplicados a pavimentação das vias urbanas de Manaus.” In: Congresso Íbero-Latinoamericano do Asfalto, XVI., 2011a, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: IBP, 2011a. Trabalho IBP2442\_11.

Silva, L. C. P., *et al.* “Estudo do comportamento mecânico por meio do módulo de resiliência de misturas asfálticas modificadas com polímero SBS e EVA para Manaus-AM.” In: Reunião de Pavimentação Urbana, 17ª., 2011b, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: ABPv, 2011b.

Silva, L. C. P., *et al.* “Avaliação da deformação permanente em misturas asfálticas para o município de Manaus – AM.” In: Congresso de Infraestrutura de Transportes, 5º., 2011c, São Paulo. Anais... São Paulo: ANDIT, 2011c.

Silva, M. A. V. “Comportamento de misturas asfálticas a quente utilizando agregado de argila calcinada.” Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia - IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.

Souza, J. B. Q. “Comportamento de misturas asfálticas a quente com agregados provenientes de jazidas de seixo no Estado do Pará.” Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande, PB, Brasil, 2007.

TRB. “Bailey Method for Gradation Selection in Hot-Mix Asphalt Mixture Design.” *Transportation Research Board of the National Academies*. Vols. E-CIRCULAR 044. Washington, DC, 2002.

Vavrik, W. R., G. A. Huber, W. J. Pine, S. H. Carpenter, e R. Bailey. “Bailey Method for Gradation Selection in HMA Mixture Design.” *Transportation Research Record*. 2002a. Circular no. E-C044.

Vavrik, W. R., W. J. Pine, e S. H. Carpenter. “Aggregate Blending for Asphalt Mix Design - Bailey Method.” *Transportation Research Record*. 2002b. no.1789. Paper no. 02-3639, 146-153.

Vavrik, W. R., W. J. Pine, G. A. Huber, S. H. Carpenter, e R. Bailey. “The Bailey Method for Gradation Evaluation: The influence of aggregate gradation and packing characteristics on Voids in Mineral Aggregate.” *Journal of the Association of Asphaltic Paving Technologists*, 2001.