



**Universidade Federal de Pernambuco**  
**Centro Acadêmico do Agreste – Núcleo de Tecnologia**  
**Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental**

**LYNEKER SOUZA DE MOURA**

**INCORPORAÇÃO DE CINZAS DE ALGAROBA GERADAS NO APL DE  
CONFECÇÕES DO AGRESTE PERNAMBUCANO EM CONCRETO  
BETUMINOSO USINADO A QUENTE - CBUQ**

**Caruaru**

**2017**

**LYNEKER SOUZA DE MOURA**

**INCORPORAÇÃO DE CINZAS DE ALGAROBA GERADAS NO APL DE  
CONFECCÕES DO AGRESTE PERNAMBUCANO EM CONCRETO BETUMINOSO  
USINADO A QUENTE - CBUQ**

Dissertação de Mestrado para  
obtenção do título de Mestre, apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Civil e Ambiental da Universidade Federal de  
Pernambuco- Centro Acadêmico do Agreste  
Área de concentração: Estruturas e Materiais.  
Linha de Pesquisa: Materiais e Componentes  
da Construção Civil.

**Orientadora: Prof. Dr<sup>a</sup>. Ana Cecília Vieira da Nóbrega**

**Co-orientadora: Prof. Dr<sup>a</sup>. Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena**

**Caruaru**

**2017**

Catálogo na fonte:  
Bibliotecária – Marcela Porfírio CRB/4 - 1878

M929i Moura, Lyneker Souza de.

Incorporação de cinzas de algaroba geradas no APL de confecções do agreste pernambucano em concreto betuminoso usinado a quente – CBUQ. / Lyneker Souza de Moura. – 2017.

97f. : il. ; 30 cm.

Orientadora: Ana Cecília Vieira da Nóbrega.

Coorientadora: Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Civil e Ambiental, 2017.

Inclui Referências.

1. Algaroba. 2. Concreto asfáltico. 3. Pavimentos. I. Nóbrega, Ana Cecília Vieira da (Orientadora). II. Lucena, Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes (Coorientadora). III. Título.

620 CDD (23. ed.)

UFPE (CAA 2017-064)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

A comissão examinadora da Defesa de Dissertação de Mestrado

**INCORPORAÇÃO DE CINZAS DE ALGAROBA GERADAS NO APL  
DE CONFEÇÕES DO AGRESTE PERNAMBUCANO EM CONCRETO  
BETUMINOSO USINADO A QUENTE – CBUQ**

Defendida por

LYNEKER SOUZA DE MOURA

Considera o candidato APROVADO

Caruaru, 24 de fevereiro de 2017

---

ANA CECÍLIA VIERIRA DA NOBREGA – PPGECAM/UFPE  
(presidente da banca)

---

HUMBERTO CORREIA LIMA JÚNIOR – PPGECAM/UFPE  
(examinador interno)

---

MAURICIO OLIVEIRA DE ANDRADE – CTG/UFPE  
(examinador externo)

*Dedico primeiramente a Deus, que me protege e me abençoa em todos os momentos, em especial aos meus pais e a minha família.*

## AGRADECIMENTOS

A minha família, pelo incentivo, em especial a minha mãe e ao meu pai que sempre me deram condições para que eu alcançasse os meus objetivos.

A Jannaína, pelo companheirismo e presença fundamental em minha vida durante o mestrado, pelos momentos de revisão textual e por tanta compreensão nas minhas horas de ausência no namoro.

A orientadora Prof. Dr.<sup>a</sup> Ana Cecília, que tem sido um anjo da guarda desde a graduação, sempre orientando-me durante os anos de pesquisa, presença constante nas conquistas. Por todas as contribuições em todas as fases deste trabalho e nas publicações.

A Prof. Shirley Minnell, por ter acreditado na ideia, pela amizade e aconselhamentos tanto na vida profissional como pessoal. Por todas as contribuições em todas as fases deste trabalho e nas publicações.

A co-orientadora Prof. Dr.<sup>a</sup> Lêda Lucena, que prontamente aceitou nosso convite e abriu as portas do laboratório de engenharia de pavimentos da UFCG. Grato sou por todas as contribuições em todas as fases deste trabalho.

Aos professores, por compartilharem os seus conhecimentos e pelo convívio fora da sala de aula.

Aos técnicos do Laboratório Tarcísio de Lima, Gilson Oliveira, Givaldo “*in memorian*” e o graduando Conrado Silva, pelos auxílios com os ensaios de laboratório.

Aos professores Dr. Maurício Andrade e Dr. Humberto Lima, por aceitarem o convite para a banca e nos honrarem com suas contribuições.

Aos donos da lavanderia Pais e Filhos, que me receberam tão bem em sua empresa, sobretudo o Sr. Aurimendes, que junto com seus filhos e esposa, estavam sempre dispostos a ajudar no que fosse preciso.

Aos colegas de classe, especialmente Heleno José e Renan Gustavo, pela amizade e companheirismo nos momentos de sufoco.

A FACEPE, pelo apoio financeiro, e ao projeto Casadinho.

*“Por maior que sejam seus sonhos, o sonho de Deus é maior. Ele sabe o que você pede, mas o que Ele quer dar é melhor. Você hoje não pode entender, pois só pede o que cabe em suas mãos, infinitos são os sonhos de Deus pra você.”*

– Robson Fonseca

## RESUMO

As obras de pavimentação rodoviária, requerem a exploração de grandes quantidades de materiais em seu estado natural, necessitando assim da exploração de jazidas. A cinza de Algaroba pode ser aplicada como um fíler alternativo em revestimentos asfálticos, em substituição aos recursos naturais. Dessa forma, pode vir a resolver esse problema e ser um descarte ambientalmente correto para essa cinza, pois a cinza ficará aprisionada entre os grãos da mistura e envolta em um filme do ligante. Nessa ótica, tem-se a proposta da incorporação dessa cinza como fíler no concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), estabilizando granulometricamente a mistura. A caracterização das cinzas de Algaroba foi realizada macroscopicamente por meio de granulometria; quimicamente por FRX (fluorescência de Raios-X); microscopicamente por MEV (microscopia eletrônica de varredura) e mineralógica por DRX (difração de Raios-X). A estabilidade da mistura por meio da análise do método MARSHALL. Além disso, resistência à tração, módulo de resiliência, resistência a fadiga e resistência ao dano por umidade induzida (Lottman), foram avaliados para as misturas com 3,0%, 3,5%, 4,5% de adição de cinza às misturas com teor de ligante ótimo, comparativamente à mistura de referência (sem cinza de Algaroba). A cinza de Algaroba é composta de carbonato de cálcio e apresentou características granulométricas e físicas compatíveis com seu uso como fíler alternativo em materiais asfálticos. O teor ótimo de ligante foi de 5,5% para as misturas. Os resultados apontam que a incorporação de 3,5 à 4,0% de cinza na composição granulométrica de CBUQ (faixa "C" do DNIT) apresentou melhorias nas propriedades mecânicas de resistência à tração, módulo de resiliência, fadiga e dano a água, sendo assim tecnicamente viável sua aplicação como forma de destinar este resíduo.

**Palavras-chave:** Cinza de Algaroba. Asfalto. CBUQ. Fíler. Pavimentação.

## ABSTRACT

Road pavement constructions require big amounts of natural raw materials, extracted from deposits. The Algaroba ash can be applied as an alternative filler in asphalt coatings instead of the natural resources. In this way, its use can come to solve this problematic, as well as being an environmentally correct disposal for this ash. Since the ash will be trapped between the grains of the mixture and wrapped in a film of the binder. In this perspective, it is proposed to incorporate this ash as filler in the hot-bituminous concrete (HMA), stabilizing granulometrically the binder. Characterization of Algaroba ashes was macroscopically performed by granulometry, as well as chemically by X-ray fluorescence (XRF) and mineralogy X-ray diffraction by XRD. Their morphology was also visualized using scanning electron microscopy (SEM). The stability of the composite was carried out by MARSHALL method. Also, tensile strength, modulus of resilience, fatigue strength and resistance to damage by induced humidity (Lottman) were evaluated for the mixtures with 3.0%, 3.5%, 4.5% addition of ash to the mixtures with optimum binder content, compared to the reference mixture (without Algaroba ash). The ash of Algaroba is composed of calcium carbonate and presented granulometric and physical characteristics compatible with its use as an alternative filler in asphaltic materials. The optimum binder content was 5.5% for blends. The ash of Algaroba was efficient to contribute with the compactness of the system. The results indicate that the incorporation of 3.5 to 4.0% of ash in the HMA according to the grain size composition "C" (range of DNIT) showed improvements in the mechanical properties. The tensile strength, the modulus of resilience the durability by the fatigue and water damage were all improved, thus being technically feasible its application as a way of allocating this residue.

**Keywords:** Algaroba ash. Asphalt. HMA. Filler. Paving.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Croqui de localização do APL têxtil do agreste pernambucano. ....	20
Figura 2: Evolução do APL ao longo dos anos.....	20
Figura 3: Distribuição das fontes de energia no Brasil no ano de 2015. ....	21
Figura 4: Consumo final de biomassa no Brasil como fonte de energia.....	22
Figura 5: Descarte indevido dos resíduos provenientes das lavanderias.....	23
Figura 6: Algarobeira adulta. ....	24
Figura 7: Aspecto das cinzas de Algaroba coletadas nas lavanderias in natura (A) e após peneiramento em malha 200 (B). ....	26
Figura 8: Classificação dos ligantes asfálticos. ....	29
Figura 9: Esquema metodológico.....	36
Figura 10: Curva de viscosidade versus temperatura do ligante.....	38
Figura 11: Processo de queima da lenha de Algaroba para obtenção da cinza. ....	39
Figura 12: Granulometria a laser da cinza de Algaroba. ....	40
Figura 13: Difratoograma de raios-X da cinza de Algaroba.....	42
Figura 14 - Analise termogravimétrica da cinza de Algaroba. ....	43
Figura 15: Microscopia eletrônica de varredura para cinza de Algaroba. (a) 500X SE, (b) 1200X SE, (c) 1200X BSE, (d) 5000X SE, (e) 12000X SE. ....	44
Figura 16: Peneiras com diversas aberturas. ....	45
Figura 17: Equipamento Los Angeles. ....	46
Figura 18: Ensaio de adesividade ao ligante asfáltico.....	48
Figura 19: Compactador de laboratório Marshall. ....	51
Figura 20: Prensa hidráulica para compressão diametral. ....	52
Figura 21: Metodologia Marshall. ....	53
Figura 22: Caracterização geométrica dos corpos de prova. ....	55
Figura 23: Corpos de prova em repouso.....	55
Figura 24: Realização do ensaio de resistência à tração. ....	56
Figura 25: Corpo de prova preparado para o ensaio de módulo de resiliência. ....	57
Figura 26: Equipamento utilizado para os ensaios de fadiga e módulo de resiliência. ....	59
Figura 27: Sequência do procedimento para realização do ensaio Lottman.....	60
Figura 28: Curva granulométrica da cinza de Algaroba. ....	61

Figura 29: Composição granulométrica dos agregados. ....	62
Figura 30: Curva granulométrica, faixa “C” com 0% de cinza. ....	65
Figura 31: Curva granulométrica, faixa “C” com 3,5% de cinza. ....	65
Figura 32: Curva granulométrica, faixa “C” com 4,0% de cinza. ....	66
Figura 33: Curva granulométrica, faixa “C” com 4,5% de cinza. ....	66
Figura 34: Ensaio de adesividade o ligante.....	68
Figura 35: Parâmetros de dosagem para 0% de adição de cinza de Algaroba.....	70
Figura 36: Parâmetros de dosagem para 3,5% de adição de cinza de Algaroba.....	71
Figura 37: Parâmetros de dosagem para 4,0% de adição de cinza de Algaroba.....	72
Figura 38: Parâmetros de dosagem para 4,5% de adição de cinza de Algaroba.....	73
Figura 39: Variação da densidade teórica nas misturas com adição com cinza. ....	74
Figura 40: Variação da densidade aparente nas misturas com adição com cinza. ...	75
Figura 41: Variação da porcentagem de vazios nas misturas com adição com cinza. .....	76
Figura 42 - Variação dos vazios preenchidos com betume nas misturas com adição com cinza. ....	77
Figura 43: Variação da estabilidade Marshall (kgf) nas misturas com adição com cinza. .....	78
Figura 44: Variação da fluência Marshall nas misturas com adição de cinza de Algaroba.....	78
Figura 45: Resistência a tração das misturas com adição com cinza de Algaroba. ...	80
Figura 46: Ensaio de módulo de resiliência.....	81
Figura 47: Curvas de fadiga. ....	83
Figura 48: Relação de resistências a tração RRT (Lottman).....	85

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparativo das propriedades da lenha de Algaroba com espécies nativas. .....	25
Tabela 2: Percentuais de metais presentes na cinza de algaroba em relação aos sólidos fixos.....	26
Tabela 3: Resultados da caracterização do ligante CAP 50/70 .....	37
Tabela 4: Massa específica e área específica da cinza com partículas $\leq 75\mu\text{m}$ . .....	40
Tabela 5: Composição química da cinza de Algaroba, em % de óxidos. ....	41
Tabela 6: Carga abrasiva para o ensaio de abrasão “Los Angeles” .....	46
Tabela 7: Graduação para ensaio abrasão “Los Angeles” .....	47
Tabela 8: Especificações granulométricas para agregados para traço de CBUQ da faixa C. ....	50
Tabela 9: Especificações de Concreto Asfáltico CA.....	50
Tabela 10: Quantitativo de corpos de prova para ensaios mecânicos. ....	54
Tabela 11: Composição granulométrica da mistura com 0% de cinza de Algaroba. .	63
Tabela 12: Composição granulométrica da mistura com 3,5% de cinza de Algaroba. .....	63
Tabela 13: Composição granulométrica da mistura com 4,0% de cinza de Algaroba. .....	64
Tabela 14: Composição granulométrica da mistura com 4,5% de cinza de Algaroba. .....	64
Tabela 15: Caracterização física dos agregados. ....	67
Tabela 16: Quantitativo de Corpos de Prova para ensaio Marshall. ....	68
Tabela 17: Parâmetros Metodologia Marshall. ....	74

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

APL: Arranjo produtivo local

ASTM: *American Society for Testing Materials*

BET: Brunauer, Emmett e Teller

CAP: Cimento asfáltico de petróleo

CBUQ: Concreto Betuminoso Usinado a Quente

CETENE: Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste

DNIT: Departamento nacional de infraestrutura de transporte

DRX: Difractometria ao raio-X

FACEPE: Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco

GPEMAT: Grupo de Pesquisa em Estruturas e Materiais da Universidade Federal de Pernambuco/Centro Acadêmico do Agreste - UFPE/CAA

LVDT: Linear Variable Diferencial Transducers

MEV: Microscópio Eletrônico de Varredura

MR: Módulo de resiliência

NBR: Norma Brasileira

R.B.V.: Relação betume vazios

RMR: Região Metropolitana do Recife

RT: Resistência a tração

SEBRAE: Serviço Brasileiro de Apoio às Micros e Pequenas Empresas

UFCG: Universidade Federal de Campina Grande

UFPE: Universidade Federal de Pernambuco

UFRN: Universidade Federal do Rio Grande do Norte

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>1.1 Problemática e justificativa.....</b>	<b>16</b>
<b>1.2 Objetivos .....</b>	<b>18</b>
1.2.1 Objetivo geral .....	18
1.2.2 Objetivos específicos .....	18
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1 APL de Confeções Pernambucano .....</b>	<b>19</b>
<b>2.2 Cinzas Geradas no APL de Confeções Pernambucano .....</b>	<b>21</b>
<b>2.3 Cinzas de Algaroba.....</b>	<b>23</b>
<b>2.4 Aplicações da cinza de Algaroba na Engenharia Civil .....</b>	<b>27</b>
<b>2.5 Misturas betuminosas .....</b>	<b>28</b>
<b>2.6 Ligantes asfálticos.....</b>	<b>28</b>
<b>2.7 Influência do fíler em misturas asfálticas .....</b>	<b>29</b>
<b>2.8 Uso de resíduos e cinzas como fíleres em misturas asfálticas.....</b>	<b>30</b>
<b>2.9 Avaliações de propriedades das misturas betuminosas .....</b>	<b>35</b>
<b>3 MATERIAIS E METODOLOGIA .....</b>	<b>36</b>
<b>3.1 Materiais utilizados.....</b>	<b>37</b>
3.1.1 Ligante asfáltico .....	37
3.1.2 Cinza de Algaroba.....	38
3.1.2.1 <i>Análise de BET (área superficial específica e porosidade das partículas).....</i>	<i>40</i>
3.1.2.2 <i>Análise de FRX (fluorescência de raios-X).....</i>	<i>41</i>
3.1.2.3 <i>Análise de DRX (difração de raios-X).....</i>	<i>41</i>
3.1.2.4 <i>Análise termogravimétrica .....</i>	<i>42</i>
3.1.2.5 <i>Análise da MEV (microscopia eletrônica de varredura).....</i>	<i>43</i>

3.1.3 Agregados.....	44
<b>3.2 Ensaio para avaliação das propriedades dos materiais.....</b>	<b>45</b>
3.2.1 Ensaio para caracterização dos agregados .....	45
3.2.1.1 <i>Granulometria</i> .....	45
3.2.1.2 <i>Ensaio de Abrasão “Los Angeles”</i> .....	46
3.2.1.3 <i>Forma das partículas</i> .....	47
3.2.1.4 <i>Massa específica e absorção</i> .....	47
3.2.1.5 <i>Ensaio de adesividade</i> .....	48
3.2.1.6 <i>Equivalente de areia</i> .....	48
3.2.1.7 <i>Densidade real</i> .....	49
3.2.1.8 <i>Massa específica real</i> .....	49
<b>3.3 Metodologia de dosagem.....</b>	<b>49</b>
3.3.1 Determinação da faixa granulométrica.....	49
3.3.2 Metodologia Marshall .....	51
3.3.3 Ensaio para propriedades mecânicas .....	54
3.3.3.1 <i>Resistência a tração</i> .....	54
3.3.3.2 <i>Módulo de resiliência</i> .....	56
3.3.3.3 <i>Resistência a fadiga</i> .....	58
3.3.3.4 <i>Resistência ao dano por umidade induzida</i> .....	59
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>61</b>
<b>4.1 Caracterização da cinza de algaroba .....</b>	<b>61</b>
4.1.1 Caracterização granulométrica da cinza de Algaroba .....	61
<b>4.2 Caracterização dos agregados .....</b>	<b>62</b>
<b>4.3 Metodologia de dosagem Marshall .....</b>	<b>68</b>
<b>4.4 Ensaio para propriedades mecânicas.....</b>	<b>79</b>
4.4.1 Resistência à tração.....	79
4.4.2 Módulo de resiliência.....	81

4.4.3 Resistência a fadiga.....	82
4.4.4 Resistência ao dano por umidade induzida.....	84
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>87</b>
<b>5.1 Conclusões.....</b>	<b>87</b>
<b>5.2 Sugestões para trabalhos futuros.....</b>	<b>88</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>89</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Problemática e justificativa

No agreste pernambucano, a lenha de Algaroba é uma das principais fontes de energia de alguns segmentos industriais de grande importância econômica para a região. Entre estes, destaca-se o polo de confecções, onde a Algaroba é utilizada em cerca de 240 lavanderias para o aquecimento de água no processo de tingimento do jeans e na indústria de cerâmica vermelha, como combustível para os fornos de tratamento térmico. Estima-se que em uma lavanderia de médio porte são gerados cerca 6.500 kg de cinza mensalmente (MELO, 2012).

A Algaroba (*Prosopis Juliflora*) é uma árvore exótica proveniente do Peru, que foi introduzida no Brasil e se adaptou ao clima e ao estilo da terra da Caatinga, podendo atingir de 10 a 20 metros de altura, não exige muita água e cresce em terrenos salobros. Além disso, ela é uma fonte de alimento para os rebanhos em período de secas prolongadas, mas, com seu rápido crescimento e propagação, vem tomando espaço de espécies nativas. A madeira é boa para lenha, pois segundo Pereira (2002), o seu poder calorífico chega aos 21.472,29 KJ/Kg.

Na queima de outras madeiras, como por exemplo o eucalipto para produção de energia térmica, segundo Borlini *et al.* (2005), ocorre a geração de grande quantidade de cinzas, que podem conter metais e causar poluição do ar.

A destinação inadequada pode causar poluição e, conseqüentemente, uma degradação ambiental. Na situação em questão, não existe controle sobre a disposição final, justificando assim, estudos que envolvam reaproveitamento da cinza de algaroba como material de construção.

As discussões e a conscientização de que as matérias primas são finitas e que os resíduos e impactos ambientais gerados em todas as cadeias produtivas precisam de soluções rápidas e eficientes, são características dos últimos quarenta anos.

Pires (2016) em sua pesquisa relembra que o GPEMAT (Grupo de Pesquisa em Estruturas e Materiais da Universidade Federal de Pernambuco/Centro Acadêmico do Agreste - UFPE/CAA) encontra-se empenhado ao longo do tempo em criar alternativas para a incorporação desse resíduo na construção civil, principalmente pela falta de destinação adequada deste resíduo, gerado em quantidades consideráveis, resultantes da queima da lenha de Algaroba. Alguns estudos e

alternativas são encontradas para equacionar a relação matéria prima/resíduos e estão na reciclagem dos materiais ou na utilização de seus resíduos em outras cadeias produtivas (MELO, 2012; MOTA, 2014; NASCIMENTO, 2014; CAVALCANTI FILHO, 2016). Até então, os trabalhos eram voltados para blocos e argamassas de cimento Portland.

Esta pesquisa propõe outra alternativa para destinação final do resíduo que é a incorporação deste na indústria da pavimentação. Outros autores corroboram com a premissa de que resíduos podem ser usadas como fíler alternativo no pavimento asfáltico (CHAN *et al.*, 1996; ÇELIK, 2008; ALI e FIAZ, 2009; MELOTTI *et al.*, 2013; RONGALI *et al.*, 2013; SOBOLEV *et al.*, 2014; MODARRES, RAHMANZADEH e AYAR, 2015; MISTRY e ROY, 2016; HUWAE *et al.*, 2016; AL-HDABI, 2016), indicando que a questão ambiental tem sido evidenciada nesse setor industrial. Dessa forma, o estudo da cinza de Algaroba pode diminuir a busca por novos recursos naturais.

O fíler ou material de enchimento constitui um material mineral inerte em relação aos demais componentes da mistura asfáltica, finamente dividido, passando pelo menos 65% na peneira de 0,075 mm de abertura de malha quadrada DNIT ME 367/1997. Santana (1995) destaca que os fíleres podem melhorar o comportamento reológico, mecânico, térmico e de sensibilidade a água, desde que obedecidos os limites para granulometria e plasticidade. Assim, o autor sustenta que o uso de fíleres é importante para aumentar a uniformidade na consistência e na suscetibilidade térmica, que podem advir de eventuais irregularidades na produção de ligantes asfálticos e na confecção da massa asfáltica. Além disso, o fíler tem um importante papel no controle da flexibilidade e, conseqüentemente, da resistência à fadiga das misturas asfálticas, o que pode ser controlado em função da relação fíler/ligante, garantindo um índice de vazios adequado (ROBERT *et al.*, 1996).

Melo (2012) identificou que as cinzas de Algaroba geradas no APL de confecções pernambucano que passam na peneira nº 200 têm grãos entre 2,46 e 43,91 µm. Portanto, tem-se a possibilidade da incorporação dessa cinza como fíler no concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), com a premissa de estabilizar granulometricamente a mistura.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo geral

Avaliar a incorporação da cinza da Algaroba, gerada no APL de confecções pernambucano, como fíler em concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ).

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Formular e avaliar a estabilidade granulométrica de um traço de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) com incorporação máxima das cinzas de Algaroba;
- realizar a dosagem do concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) com adição do fíler da cinza de Algaroba pelo método Marshall;
- avaliar as propriedades mecânicas das misturas betuminosas tipo CBUQ com e sem adição de fíler de cinza de Algaroba por meio dos ensaios: Estabilidade Marshall, resistência a tração, fadiga e módulo de resiliência;
- verificar a influência do fíler da cinza de Algaroba na susceptibilidade das misturas asfálticas a presença de água.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 APL de Confeções Pernambucano

No agreste de Pernambuco está localizado um importante polo produtor têxtil no Brasil, onde os municípios de Caruaru, Santa Cruz do Capibaribe e Toritama são os principais integrantes, cuja especialização é em fabricação de vestuário. Nesse contexto, percebe-se uma concentração regional de predominantemente micro, pequenas e médias empresas, especializadas em alguns itens de vestuário como: casual, urbana, roupas infantis, moda íntima, moda praia e jeans.

Segundo levantamentos do Programa de Produção e Difusão de Inovações para a Competitividade de APLs do estado de Pernambuco (2009), o polo de Confeção do Agreste nasceu a partir de uma pequena feira em Caruaru, que começou no final dos anos 40. Na mesma época, Santa Cruz do Capibaribe ainda era vila e trabalhava com a venda de retalhos de tecidos e a confecção de cobertas de tecido emendado oriundos de subprodutos de fábricas. Desde então surgiu o fabrico de roupas com retalhos maiores a preços populares. Com o passar do tempo outros segmentos foram incorporados e 50 anos depois o APL têxtil do Agreste Pernambucano chegou ao nível atual em que Santa Cruz do Capibaribe é o maior polo de confecções do Norte/Nordeste do País. A confecção de roupas no Agreste de Pernambuco foi uma alternativa de ocupação e renda, para contrapor as adversidades climáticas, geográficas e econômicas enfrentadas na prática da agricultura de subsistência e pecuária, impostas pela aridez de algumas regiões do Nordeste brasileiro. Em relação a Recife, o município de Caruaru está localizado a 138 km; já Toritama a 173 km e Santa Cruz do Capibaribe a 196 km da capital pernambucana, destacados na Figura 1.

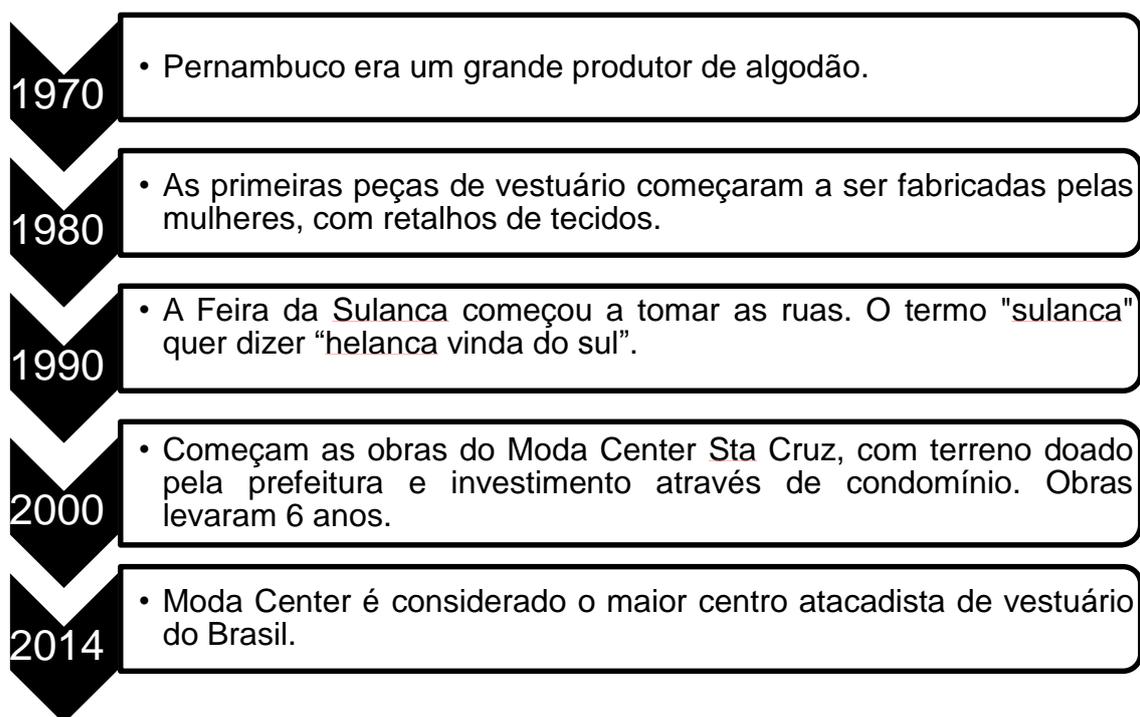
Figura 1: Croqui de localização do APL têxtil do agreste pernambucano.



Fonte: P. P. D. I. C. de APLs do estado de Pernambuco, 2009. Adaptado.

O jornal do comércio, em sua edição online publicada em 14 de dezembro de 2014, veiculou uma reportagem com o título “Polo de Confeções do Agreste: da Sulanca à industrialização” onde relata a evolução deste APL, podendo ser visualizado na Figura 2.

Figura 2: Evolução do APL ao longo dos anos.



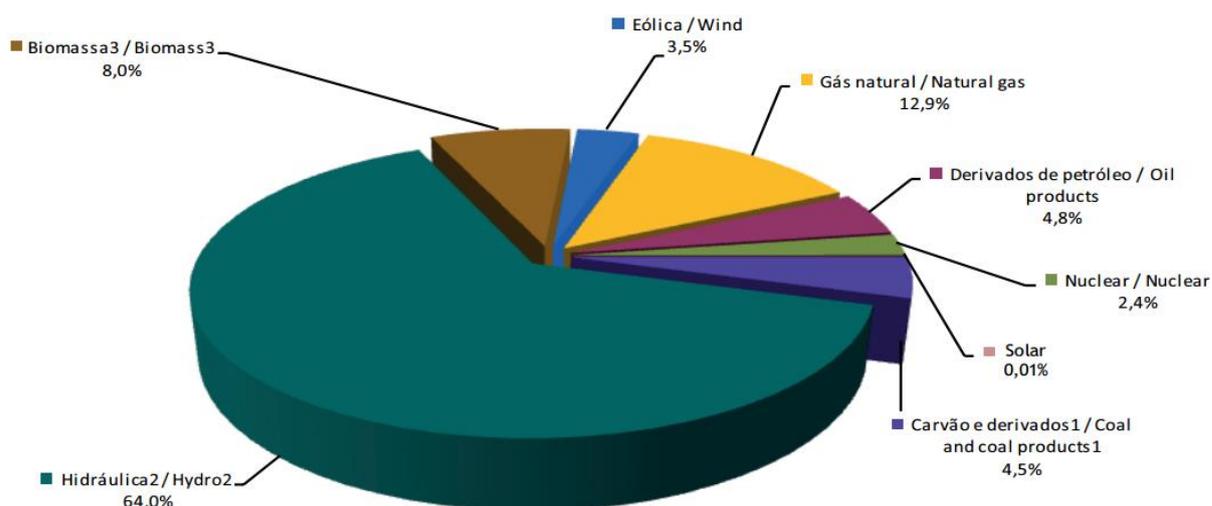
Fonte: O autor (2017). Adaptado do Jornal do Comércio.

Atualmente o polo de confecção do Agreste de Pernambuco é formado por 13 cidades: Agrestina, Belo Jardim, Bom Jardim, Brejo da Madre de Deus, Caruaru, Cupira, Riacho das Almas, Santa Cruz do Capibaribe, Santa Maria do Cambucá, Surubim, Taquaritinga do Norte, Toritama e Vertentes. Segundo dados do Sindicato das Indústrias do Vestuário do Estado de Pernambuco (SINDVEST PE, 2016), este é o segundo maior polo do país e representa 9% da produção nacional de confecção, fabricando anualmente cerca de 480 milhões de peças. O Polo dispõe de 12 mil empresas, que geram 120 mil empregos diretos e 80 mil indiretos.

## 2.2 Cinzas Geradas no APL de Confecções Pernambucano

O Brasil, segundo dados do balanço energético nacional do Ministério das Minas e Energia (2016), dispõe de uma matriz elétrica de origem predominantemente renovável, com destaque para a geração hidráulica que responde por 64,0% da oferta interna. As fontes renováveis representam 75,5% da oferta interna de eletricidade no Brasil, que é a resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional mais as importações, que são essencialmente de origem renovável. As biomassas representaram 8% de toda a energia consumida no país no ano de 2015 (Figura 3).

Figura 3: Distribuição das fontes de energia no Brasil no ano de 2015.

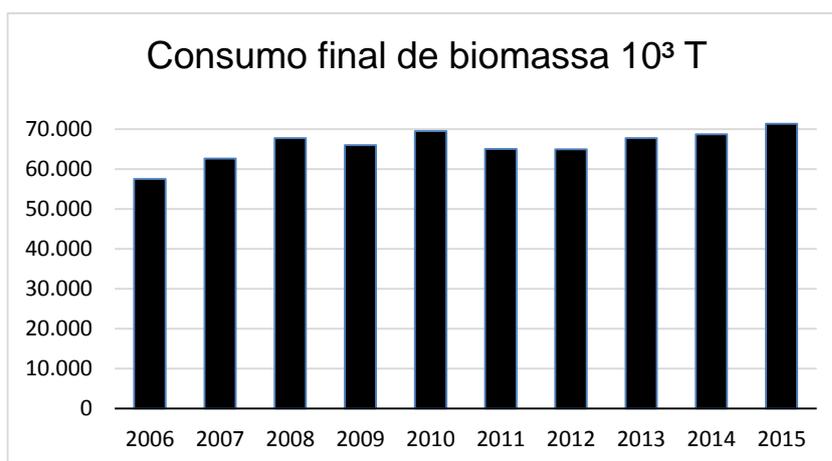


Fonte: Balanço energético nacional (2016).

No Brasil, historicamente a queima direta da lenha tem sido a forma de biomassa mais utilizada para fins energéticos. O uso da queima de biomassa como

fonte de energia teve pequenas oscilações ao longo dos anos, porém nos últimos quatro anos obteve crescimento, assim aumentando sua representatividade dentro da oferta de energia elétrica renovável (Figura 4). Alguns exemplos de biomassa são o bagaço de cana e lenha. Outras fontes primárias renováveis, são o carvão vegetal e álcool, por exemplo.

Figura 4: Consumo final de biomassa no Brasil como fonte de energia.



Fonte: Balanço energético nacional (2016).

No Agreste Pernambucano a lenha é uma das principais fontes de energia para o polo de confecções, onde é utilizada em mais de 240 lavanderias para o aquecimento de água no processo de tingimento do jeans. A indústria da cerâmica vermelha utiliza a lenha como combustível para os fornos de cozimento de tijolos, telhas e artefatos cerâmicos.

Estima-se que em uma lavanderia, para cada peça produzida são geradas aproximadamente 155g de cinza de algaroba; dessa forma, uma lavanderia de porte médio que produz um volume médio mensal de 42.000 peças de jeans beneficiado, nesse mesmo período gera 6500 kg de cinzas (MELO, 2012).

Após o processo de queima desta ocorre a geração de grande quantidade de cinzas, entretanto em sua maioria não recebem qualquer controle sobre a disposição final, e acabam sendo depositados em aterros sanitários ou em terrenos particulares gerando poluição ao meio ambiente. A poluição pode ser definida como a introdução no meio ambiente de qualquer forma de matéria ou energia que possa afetar negativamente o homem ou outros organismos.

A poluição ambiental pode ser considerada como a degradação do ambiente por atividades que direta ou indiretamente afetem a saúde, a segurança e o bem-estar da população.

A ideia de poluição ambiental abrange vários aspectos, como a contaminação do ar, das águas e do solo. Esses recursos são capazes de diluir concentrações de substâncias lançadas em processos naturais, porém, as ações antrópicas esgotam essa capacidade de depuração. A poluição pode ocorrer com a presença, lançamento ou liberação no ambiente de resíduos orgânicos e domiciliares, resíduos industriais, gases poluentes e elementos químicos, entre outros (FELLENBEG, 1980).

As cinzas dispostas de forma inadequada (Figura 5) podem ser carreadas e potencializar o risco de contaminação dos corpos hídricos, dessa forma podendo alterar pH, cor, turbidez, entre outras características, como também o solo.

Figura 5: Descarte indevido dos resíduos provenientes das lavanderias.

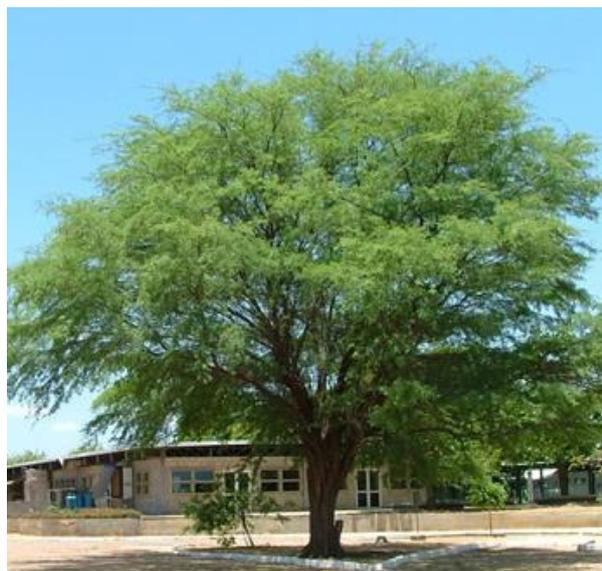


Fonte: Leloup (2013).

### 2.3 Cinzas de Algaroba

A Algarobeira (*Prosopis Juliflora*) (Figura 6) é uma árvore exótica da família das leguminosas e foi introduzida na região do Agreste de Pernambuco no ano de 1942, no município de Serra Talhada-PE, com sementes procedentes do Peru.

Figura 6: Algarobeira adulta.



Fonte: Ribaski *et al.* (2009).

A espécie possui boa adaptação em regiões de baixo índice pluviométrico, entre 150 mm e 1.200 mm anuais. A maior produção de vargens ocorre em regiões de clima tropical que apresentam temperatura média anual superior a 20 °C, precipitação anual em torno de 300-500 mm, e umidade relativa entre 60 a 70 %. Estas apresentam resistência a longas estiagens, com períodos superiores a nove meses de seca. As árvores adultas podem atingir de 10 a 20 metros altura e são consideradas de uso múltiplo, sendo seus frutos importantes fontes de proteínas e carboidratos, principalmente em regiões mais secas especialmente para o alimento do gado. Os plantios de Algaroba têm sido realizados para diversas finalidades, como proteção do solo contra erosão, arborização de ruas, sombreamento, conservação e melhoramento de pastagens e suporte a apicultura.

Drummond *et al.* (1984) em estudos defendia a algarobeira como uma alternativa para preservar as espécies nativas do nordeste semiárido e constataram que a sua madeira é durável, com densidade básica na ordem de 0,85 g.cm<sup>-3</sup>, sendo utilizada em mourões, tábuas, dormente, estacas para cerca, lenha e carvão (RABASKI *et al.* 2009). Esta possui uma lenha de alto poder calorífico que chega aos 21.472,29 KJ/Kg (PEREIRA, 2002), e baixa produção de cinzas comparativamente a outras espécies (Tabela 1), o que viabiliza seu uso como matriz energética, pois fornece energia com baixa geração de resíduo frente a outras espécies.

Tabela 1: Comparativo das propriedades da lenha de Algaroba com espécies nativas.

<b>Espécie</b>	<b>Densidade básica (g.cm<sup>-3</sup>)</b>	<b>Carvão (%)</b>	<b>Carbono (%)</b>	<b>Cinza (%)</b>	<b>Teor de umidade (%)</b>
Algaroba	0,85	43,05	74,12	1,56	1,26
Angico	0,78	42,25	70,45	5,76	1,04
Aroeira	0,66	38,44	12,58	4,83	1,17
Baraúna	0,12	37,51	12,12	4,84	1,02
Jurema Preta	0,83	41,88	12,58	1,71	1,26

Fonte: Drummond *et al.* (1984). Adaptada.

Os resultados obtidos para a Algaroba (*Prosopis Juliflora*) por Drummond *et al.* (1984) são semelhantes a outros autores mais recentes como Pereira (2002), ratificando os resultados encontrados por pesquisas mais antigas.

Lima (1994) relata que a Algaroba (*Prosopis Juliflora*) é uma espécie que se destaca quanto a produção de biomassa, com 27,109 toneladas por hectare aos oito anos de idade, tendo bom poder calorífico e baixa produção de cinzas, sendo assim, se mostra uma boa espécie para produção de energia.

Segundo Melo (2012) as partículas da cinza de Algaroba que passaram na peneira malha N<sup>o</sup>200 (0,075 mm) são equivalentes a 74,5% em massa Figura 7. Estas possuem dimensões predominantemente entre 2,46 e 43,91  $\mu\text{m}$ , composta prevalentemente por óxido de cálcio (CaO) e óxido de potássio (K<sub>2</sub>O), com presença de pentóxido de fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), óxido de magnésio (MgO), dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>), cloro (Cl), óxido de estrôncio (SrO), óxido sulfúrico (SO<sub>3</sub>), óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), dióxido de titânio (TiO<sub>2</sub>), óxido de manganês (MnO), óxido de zinco (ZnO), óxido de cobre (CuO) e óxido de rubídio (Rb<sub>2</sub>O) em menores porcentagens. Existem fases cristalinas contidas na cinza, carbonato de cálcio predominantemente, embora também se verifique a presença de quartzo e óxido de potássio. Foi detectado no DRX que parte da sílica é cristalina, que embasa a hipótese que o material mineral é inerte (MELO, 2012).

Figura 7: Aspecto das cinzas de Algaroba coletadas nas lavanderias in natura (A) e após peneiramento em malha 200 (B).



Fonte: Melo (2012).

Quanto a presença de metais, Leloup (2013) identificou que o somatório de todos os metais encontrados representa apenas 0,64% dos sólidos fixos. Estes dados podem ser visualizados na Tabela 2.

Tabela 2: Percentuais de metais presentes na cinza de algaroba em relação aos sólidos fixos

Metal	Percentual (%)	Metal	Percentual (%)
Ba	0,03837	Co	0,00018
Ti	0,05178	Mn	0,02504
Fe	0,49798	Cr	0,00079
Ni	0,00089	V	0,00049
Cu	0,00811	Zr	0,00052
Zn	0,01511	Sb	0,00010
Cd	0,00004	Mo	0,00050
Ag	0,00000	Pb	0,00029

Fonte: Leloup (2013).

## 2.4 Aplicações da cinza de Algaroba na Engenharia Civil

Melo (2012) estudou diferentes formulações de argamassa de revestimento com adição de 10, 20, 30 e 40% em relação a massa de cimento. As formulações com adição foram comparadas com uma argamassa padrão (sem adição). Os resultados indicaram que argamassas com adição de cinzas, quando comparadas com a argamassa padrão, não apresentaram tanto no estado fresco como endurecido alterações significativas de consistência e resistência. A manutenção das características das argamassas com a adição é atribuída a ação do efeito fíler, que contribuiu para uma maior compactidade do sistema.

Mota (2014) incorporou ao concreto seco, cinzas de Algaroba para confecções de peças de concreto moldadas sob pressão, onde observou-se que adições na faixa de 20% de cinzas de Algaroba foram mais efetivas na contribuição das propriedades mecânicas.

Nascimento (2014) investigou a influência da substituição gradual da cal hidratada CH I pela cinza de Algaroba (0%, 25%, 50%, 75%, 100%) em termos de propriedades das argamassas nos estados fresco (consistência e trabalhabilidade) e endurecido (resistência mecânica). Os resultados apontaram que é possível substituir até 100% de cal por cinza de Algaroba desde que esta seja beneficiada passando-a em peneira de malha 200, sem prejuízos aos sistemas cimentícios e proporcionando alterações mínimas em relação as propriedades reológicas e mecânicas das argamassas mistas.

Cavalcanti Filho (2016) avaliou a resistência a compressão simples e absorção de água de tijolos vazados de solo-cimento, produzidos a partir da substituição parcial do cimento pela cinza de Algaroba em diferentes teores de cinza de 0 % (referência), 10%, 30 %, 40 %, e 50 %. Os resultados de compressão simples e absorção de água apontam que é possível utilizar a cinza da lenha de Algaroba na substituição parcial do cimento para produzir tijolos de solo-cimento-cinza com o teor de 10% de cinza.

Moura *et al.* (2015) estudaram, em trabalho publicado 44<sup>a</sup> RAPv – REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, a possibilidade da incorporação da cinza de Algaroba em CBUQ por meio da análise do método MARSHALL. Os resultados apontam que a incorporação de porcentagens próximas a 4,0% de cinza na composição do CBUQ (faixa “C” do DNIT) não comprometeu suas características iniciais de porcentagem de

vazios, relação betume/vazios, estabilidade e fluência, sendo assim tecnicamente viável pela metodologia MARSHALL sua aplicação.

## **2.5 Misturas betuminosas**

Misturas betuminosas são materiais heterogêneos quanto à natureza de seus componentes, sendo geralmente compostos pela mistura de agregados miúdos e graúdos de modo geral pétreos, recobertos por meio de um ligante asfáltico. Estas misturas são geralmente usadas no revestimento, passando a suportar diretamente as cargas dos veículos em tráfego e a ação climática.

O revestimento asfáltico deve fornecer os requisitos hidráulicos e mecânicos de estabilidade, durabilidade, impermeabilidade, flexibilidade, resistência ao trincamento térmico e a fadiga, de acordo com o clima e o tráfego para que foram projetados (Bernucci *et al.*, 2008).

Ainda de acordo com Bernucci *et al.* (2008), o tipo de ligante asfáltico pode diferenciar as misturas betuminosas, podendo ser preparado a quente com uso de cimento asfáltico de petróleo CAP, denominando-se concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) ou a frio, utilizando emulsão asfáltica de petróleo ou asfalto diluído. Quanto à distribuição granulométrica, as misturas asfálticas a quente podem ser consideradas como densas, abertas, contínuas e descontínuas.

Segundo Lucena (2012), o pavimento quando contém os resíduos tóxicos e que podem ser misturados com os materiais constituintes, tendem a criar uma matriz sólida altamente impermeável, capturando ou fixando os resíduos dentro desta estrutura. Embora esta afirmação seja para camadas subjacentes do pavimento como bases e sub-bases, essa capacidade estende-se a camada asfáltica de rolamento. Dessa forma, misturas betuminosas tornam-se uma boa alternativa para estabilização e utilização de resíduos ou contaminantes que não tenha descarte apropriado.

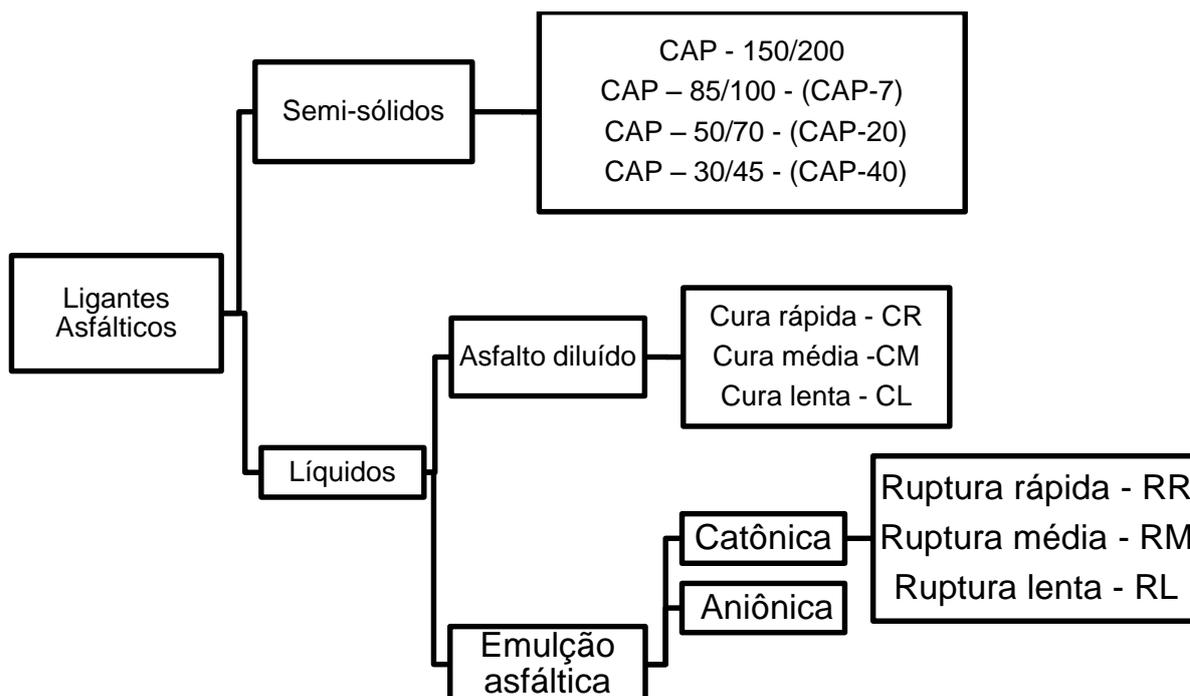
## **2.6 Ligantes asfálticos**

O ligante asfáltico é um material de construção de cor escura, utilizado principalmente na pavimentação, com propriedades aglutinantes; é derivado do petróleo, constituído principalmente de betume e outros elementos químicos em

pequena proporção, tais como: oxigênio, nitrogênio e enxofre, sendo que o elemento predominante é o betume, com cerca de 99,5% (ROBERTS *et al.*, 1996).

Na Figura 8, pode-se visualizar o esquema das subdivisões dos ligantes asfálticos.

Figura 8: Classificação dos ligantes asfálticos.



Fonte: Bernucci *et al.* (2008), adaptado.

Os ligantes asfálticos são materiais visco elásticos que podem apresentar comportamento elástico ou viscoso, segundo as condições de temperatura e tempo (ALENCAR *et al.*, 2006). A consistência do asfalto decresce à medida que aumenta a temperatura (EILER, 2009).

## 2.7 Influência do fíler em misturas asfálticas

Fíler é a porção do agregado mineral, que passa pelo menos 65% na peneira de malha quadrada de número 200 (0,075 mm de abertura), que ocupa os vazios entre as partículas de agregados graúdos e miúdos, com o objetivo de reduzir o tamanho desses vazios e aumentar a densidade e estabilidade da mistura asfáltica.

Para o CBUQ, o fíler pode ser o pó de pedra, calcário e cimento (que não reagirá por ausência de água na temperatura de mistura). Caso seja de origem

mineral, o mesmo deverá estar perfeitamente pulverizado e isento de argila, silte, mica e de matéria orgânica.

O fíler preenche os vazios entre os agregados graúdos nas misturas e altera as propriedades dos ligantes asfálticos, pois age como parte ativa do mástico (combinação de ligante asfáltico, fíler e ar) (BARDINI *et al.*, 2010), uma vez que a fração mais fina do fíler fica em suspensão no ligante asfáltico, aumentando sua consistência (TUNNICLIFF, 1962 *apud* BARDINI *et al.*, 2013).

A AASHTO (1991) quantificou qual a fração do fíler ultrafino é incorporado ao ligante e altera as suas propriedades. Partículas menores de 20  $\mu\text{m}$ , e até com alguma porção menor que 5  $\mu\text{m}$ , tendem a compor uma película com o ligante denominada mástico, que envolve as partículas de agregados miúdos e graúdos.

Motta e Leite (2000) estudaram o efeito de três tipos diferentes de fíleres: pó calcário, cimento Portland e pó de pedra. Os resultados dos ensaios mecânicos demonstraram que o efeito da granulometria do fíler é efetivo na rigidez da mistura betuminosa, pois quanto menor o tamanho de partícula do fíler, maior a incorporação do mineral diretamente no ligante, aumentando a rigidez da mistura. Em síntese, pode-se notar que, a razão do volume de ligante livre pelo volume total de ligante tem efeito significativo na rigidez do mástico.

## **2.8 Uso de resíduos e cinzas como fíleres em misturas asfálticas**

O concreto asfáltico é o material mais utilizado na pavimentação, devido ao seu desempenho de serviço superior no fornecimento de conforto, estabilidade, durabilidade e resistência a água. Porém, o custo crescente de materiais e energia e a falta de recursos disponíveis motivaram os engenheiros de rodovias a explorar novas alternativas na construção de novas estradas (YILMAZ *et al.*, 2011).

Bock *et al.* (2009) relatam pesquisas com o objetivo de encontrar novos materiais para a construção rodoviária que apresentem desempenho satisfatório e custos relativamente baixos (SPECHT, 2002; BERNUCCI, 2002). Estes estudos objetivam a melhoria da qualidade dos revestimentos asfálticos, de modo a proporcionar benefícios de conforto e segurança aos usuários, possibilitando também uma redução dos custos.

Chan *et al.* (1996) verificaram que a utilização de 2% de cinzas volantes de carvão melhoraram em 3,5% o módulo resiliência da mistura tanto a temperaturas

elevadas como em baixas temperaturas. Misturas asfálticas de cinzas de carvão são recomendadas para uso em estradas secundárias com volumes baixos de tráfego, estacionamentos e acostamentos (CHURCHILL e AMIRKHANIAN, 1999).

Modarres e Rahmanzadeh (2014) pesquisaram comparativamente misturas de referência com pó calcário como fíler, e misturas com o pó de resíduo de carvão e suas cinzas. Verificou-se que houve melhora na estabilidade Marshall, resistência a tração e o módulo de resiliência da mistura com os resíduos.

Ali e Fiaz (2009) utilizaram cinzas volantes, juntamente com escória de alto forno, em substituição parcial do material de enchimento convencional em pavimentos de concreto asfáltico. Os melhores resultados em termos de estabilidade foram obtidos a nível de substituição de 30% do material de enchimento e com 4,5% teor de ligante. Essa mistura apresentou menor variação na estabilidade Marshall quando comparada com mistura de referência. Os Resultados foram apontados pelo autor como benéficos para a construção de estradas no Paquistão e outros países que experimentam alta temperatura durante o verão. Çelik (2008) utilizou cinzas volantes de termoelétricas em quantidades de 5, 6, 7, e 8% em peso do agregado total. Os resultados indicam que os valores de estabilidade obtidos a partir de misturas com cinzas volantes são maiores do que as misturas de enchimento convencionais. O maior valor de estabilidade Marshall foi obtido a partir de 5% de mistura de cinzas volantes, que foi de 1.630 kgf em condições ótimas.

Modarres *et al.* (2015) avaliaram o uso de resíduos de carvão provenientes de instalações de lavagem de carvão e resíduo de cinza de carvão comparativamente a fíleres convencionais, que neste caso foram pó de calcário, pó de zeólito e cimento Portland. Todos os fíleres foram fixados em 7% o teor de adição. Os autores constataram que a utilização do resíduo de lavagem de carvão e cinza de carvão aumentou a estabilidade da mistura cerca de 17 e 44%, respectivamente, comparando com os fíleres de pó calcário e zeólito. Para as misturas contendo cimento Portland obteve-se um acréscimo na estabilidade de aproximadamente 19% em relação ao resíduo de lavagem de carvão, já o resíduo de cinza de carvão obteve uma mesma ordem de grandeza do cimento Portland. Além disso, concluiu-se por meio de ensaios de lixiviação que o betume em misturas asfálticas a quente pode estabilizar e solidificar os metais pesados que existiam nos resíduos de carvão e suas cinzas.

Cinzas volantes de carvão podem ser utilizadas como material de enchimento, na fração de 5,3% da mistura asfáltica, associadas com resíduo de plástico 0,75% do ligante. A incorporação do composto aumentou os valores do módulo de resiliência a 35 °C e 45 °C (RONGALI *et al.*, 2013). Assim, especialmente nas áreas onde as cinzas volantes geralmente são descartadas, estas podem ser usadas como opção de substituição do material de enchimento convencional, para apoiar a sustentabilidade global (Mistrye Roy, 2016).

A cinza volante pode ser usada como opção de baixo custo para melhorar a qualidade e desempenho de cimentos asfálticos. Além disso, as estradas locais construídas com um orçamento limitado podem especificar cinzas como fíler para pavimentos asfálticos. (SOBOLEV *et al.*, 2014).

Huwae *et al.* (2016) abordaram o uso da cinza de bagaço de cana-de-açúcar como alternativa de material de enchimento para mistura asfáltica na Indonésia. Esta cinza se resume a 1% da massa original e é composta por 73% de sílica. Esta apresenta tamanho dos grãos e propriedades volumétricas semelhantes a outros materiais de enchimento utilizados. Os resultados apontaram que a adição de cinza na ordem de 60% da massa do ligante obteve melhores resultados pela metodologia Marshall, frente às outras proporções estudadas (20%, 40%, 80% e 100%). Embora tenha ficado abaixo da amostra de referência, a referida mistura foi enquadrada dentro dos limites aceitáveis na Indonésia. Para misturas com adição de 3% de cinza de bagaço de cana-de-açúcar em relação à massa total, realizadas por Lhwaint, Setyawan e Astuti (2015), verificou-se que a cinza poderia ser substituta do cimento utilizado como fíler em regiões áridas, porque é tolerante à temperatura na casa dos 60 °C, podendo assim evitar fissuras do asfalto. Na Malásia foram realizados estudos com a inserção da cinza de bagaço de cana-de-açúcar. O resultado do laboratório revela que as cinzas de bagaço de cana-de-açúcar são eficazes no aumento da estabilidade de Marshall, fluência e módulo de resiliência da mistura asfáltica convencional. A cinza de bagaço de cana-de-açúcar aumenta a estabilidade de Marshall em 0,6%, fluência 4,9% e módulo de resiliência 17,4%, respectivamente (ZAINUDIN *et al.*, 2016).

Melotti *et al.* (2013) estudaram diversos tipos de cinzas coletadas em 21 centrais elétricas da Itália e Suécia. Nelas, diferentes biomassas são utilizadas separadamente como combustível, incluindo lascas de madeira, palha, cascas de madeira e de arroz. O resultado destes estudos é de destinar a utilização das cinzas

como carga na mistura asfáltica. Apenas a cinza proveniente de lascas de madeira queimadas na unidade de Sondrio na Itália satisfaz os limites de distribuição granulométrica compatível com as cargas minerais já utilizadas em misturas betuminosas. Isso indica que para outras cinzas é necessário moê-las para obter uma classificação adequada. Os autores também chamam a atenção para a condição de estocagem das cinzas, pois pode influenciar na umidade das mesmas.

O uso combinado de 2,5% de pó calcário e 2,5% de cinza de casca de arroz queimada a 700°C proporcionou um ganho de aproximadamente 15% na estabilidade Marshall quando comparado ao uso exclusivo de fíler calcário, segundo Sargin *et al.* (2013). Em locais onde há presença de resíduos de casca de arroz, é recomendado o uso como fíler em substituição ao fíler calcário. A estabilidade Marshall de misturas asfálticas quentes pode aumentar significativamente quando o fíler convencional é substituído por cinza de casca de arroz. Esse ganho pode chegar até 65% segundo Al-Hdabi (2016).

Xue *et al.* (2014) estudaram ligantes modificados com dois tipos de cinzas de biomassa, cinza de casca de arroz e serragem de madeira. Verificou-se que não ocorreu reação química entre asfalto e cinza de biomassa.

Arabani (2010) utilizou uma variação de 0, 5, 10, 15 e 20% de resíduo de vidro na mistura asfáltica, com isso observou-se que 15% de adição de resíduo de vidro proporcionou um ganho no módulo de rigidez de até 100% comparativamente com a amostra padrão, tanto em temperaturas baixas (5°C) como em temperaturas mais elevadas (40°C). As misturas com presença de resíduo de vidro também apresentaram menor sensibilidade às variações de temperatura quando comparadas amostra de referência. Jony *et al.* (2011) observaram que o conteúdo ótimo de pó de vidro é de 7% em relação a massa total; quando essa mistura é utilizada, nota-se na estabilidade um aumento de até 13%, em comparação com a mistura que usa o fíler de cimento Portland e pó calcário. Para Salem *et al.* (2017), os resíduos de vidro triturado podem ser usados em concreto asfáltico com o tamanho máximo de 2,36 mm; para estas dimensões o valor ótimo de substituição é de 10%. Este possui frações que se enquadram como agregado miúdo e outras como fíler. Com o uso deste material nas misturas asfálticas quentes, pode-se contribuir com a diminuição da poluição e os problemas ambientais.

Outra alternativa para substituição de materiais de enchimento convencionais é o pó de rejeito de cimento Portland. Este é um subproduto da fabricação do cimento

Portland, constituído primordialmente por óxido de cálcio. Segundo Ahmed (2006), este pó pode substituir 100% do pó calcário comumente utilizado. O autor verificou aumento da resistência a tração em cerca de duas vezes e meia comparativamente ao pó calcário.

O pó de mármore também é uma alternativa aos fíleres convencionais, entretanto, Karasahine Terzi (2007) recomendam que as misturas de asfalto com presença de pó de mármore sejam indicadas para estradas secundárias e vias locais de baixo tráfego, uma vez que o asfalto com essa mistura tem deformações plásticas ligeiramente mais elevadas do que as com fíler de pó calcário.

Arabani, Babamohammadi e Azarhoosh (2014) indicam que o pó de concha marinha triturada pode ser utilizado como material de enchimento. Estas misturas com conchas apresentaram menor susceptibilidade a umidade do que o concreto betuminoso usinado a quente convencional. O uso de 3% do enchimento de conchas de Periwinkle (tipo de caramujo), mostrou uma melhoria significativa no comportamento do concreto asfáltico, em aproximadamente 10% e acrescentou ao conhecimento a possibilidade de produzir misturas mais duráveis em algumas localidades da Nigéria com maior resistência ao desgaste (NWAOLAKATA e AGWUNWAMBA, 2014).

Segundo Vasudevan (2013) o uso combinado de 1% da cinza de carvão com a cal hidratada como fíler é benéfico ao pavimento por contribuir com a diminuição do número de vazios. O autor também destaca a importância desse tipo de estudo, por conseguir utilizar esse resíduo na matriz asfáltica, dessa forma diminuindo os impactos poluidores no meio ambiente.

Martinez (2014) utilizou misturas com adição de lodos de estações de tratamento de esgoto e água. O autor verificou que as misturas que continham resíduos apresentaram melhores resultados quanto à estabilidade e de resistência a tração comparativamente com as amostras de referência.

Para Huang *et al.* (2007) o uso de materiais reciclados em asfalto de pavimento é uma boa alternativa, entretanto, para alguns casos, o custo pode ser uma restrição técnica. Este custo de processamento e captação podem ser superiores a aquisição de agregados virgens. Para melhoria deste cenário, os esforços do governo, na maioria dos casos, são essenciais para fornecer serviços de pesquisa e informação livres de restrições comerciais e aumentar a atratividade para seu uso através de legislação ou incentivos financeiros.

## 2.9 Avaliações de propriedades das misturas betuminosas

Segundo Bernucci *et al.* (2008), no tocante aos ensaios de caracterização mecânica, pode-se citar como os principais:

- ensaios convencionais - os ensaios de estabilidade e de fluência Marshall, determinam a resistência às deformações sobre o efeito da aplicação de cargas;
- ensaios de módulos - os ensaios de módulo de resiliência e módulo complexo (módulo dinâmico) são utilizados para conhecer a relação tensão-deformação dos materiais asfálticos e determinar a rigidez dos materiais;
- ensaios de ruptura - os ensaios de resistência a tração indireta e vida de fadiga, levam o material ao estado de ruptura por meio da aplicação de carregamentos estáticos e dinâmicos;
- ensaios de adesividade- envolvendo ensaios mecânicos tais como o ensaio Cântabro e o ensaio Lottman que avaliam o dano por umidade induzida (original ou modificado).

Com o intuito de compatibilizar as ações solicitantes (fatores ambientais, tráfego e parâmetros de deformabilidade dos materiais) com a capacidade intrínseca dos materiais (vida de fadiga e afundamento de trilha de roda) os métodos de dimensionamento de pavimentos visam prever o desempenho ao longo da vida útil do pavimento. Além disso, se incluem os ensaios dinâmicos ou de cargas repetidas, que tentam simular as condições reais do tráfego e permitem caracterizar mecanicamente o comportamento das misturas betuminosas (JUNIOR, 2008).

### 3 MATERIAIS E METODOLOGIA

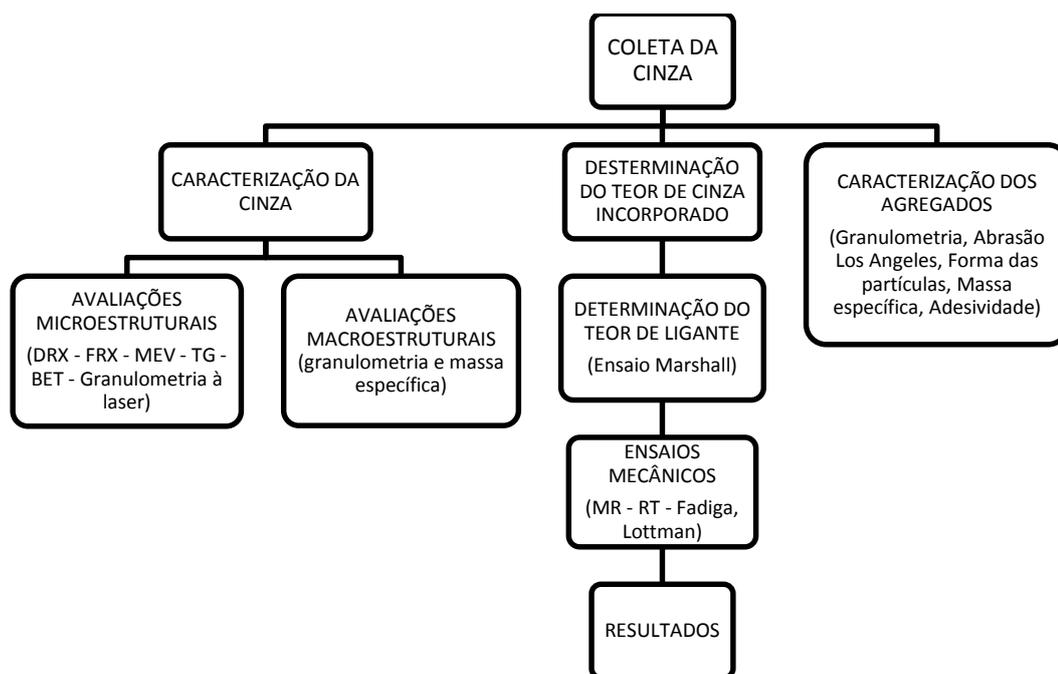
Este capítulo tem o intuito de descrever os materiais e as metodologias utilizados para: a obtenção e coleta da cinza de Algaroba, caracterização dos agregados, a elaboração do concreto asfáltico e a realização dos ensaios de caracterização e estudo do comportamento mecânico.

Este estudo divide-se em três partes:

- A primeira corresponde a caracterização dos materiais;
- A segunda é destinada à avaliação da interação da cinza dentro da faixa granulométrica;
- a terceira corresponde a avaliação das propriedades mecânicas e de adesividade do concreto betuminoso usinado a quente utilizando a incorporação de cinza de Algaroba gerada no APL de confecções do Agreste Pernambucano.

Na Figura 9, visualiza-se uma panorâmica resumida de todo procedimento metodológico.

Figura 9: Esquema metodológico.



Fonte: O autor (2017).

### 3.1 Materiais utilizados

#### 3.1.1 Ligante asfáltico

O ligante asfáltico de petróleo utilizado nesta pesquisa foi o CAP 50/70, produzido na Refinaria Landulpho Alves (RLAM), Bahia; o boletim técnico com o resultado da caracterização do ligante está apresentado na Tabela 3.

Tabela 3: Resultados da caracterização do ligante CAP 50/70

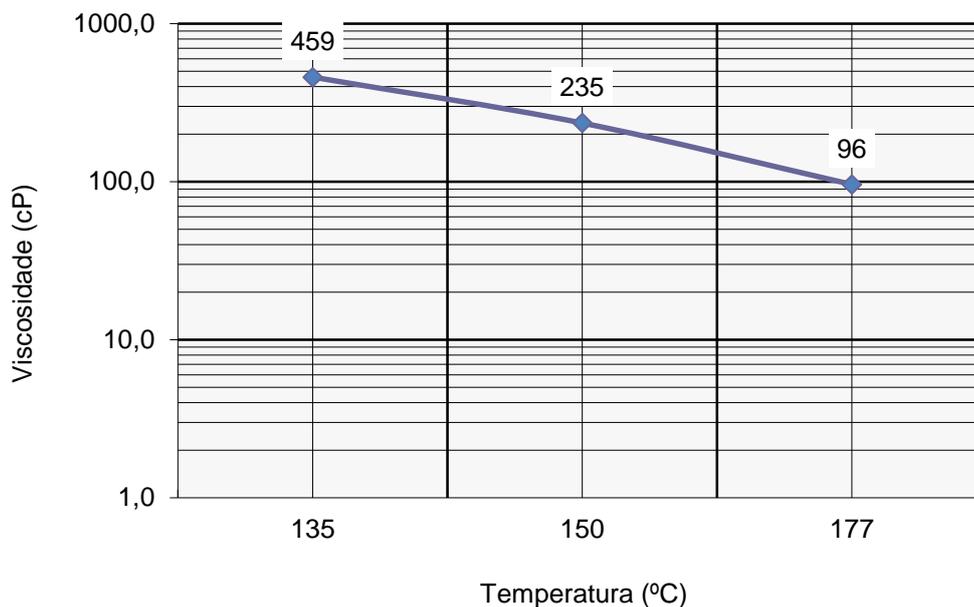
(continua)

ENSAIOS	Especificação	Resultado	Unidade
Penetração	50 a 70	51	0,1 mm
Ponto de amolecimento	46 min	52,0	°C
Viscosidade Brookfield 135 GCSP21	274 min	459	Cp
Viscosidade Brookfield 150 GCSP21	112 min	235	Cp
Viscosidade Brookfield 177 GCSP21	57 a 285	96	Cp
Rtfot- Penetração retida	55 min	59	%
Rtfot- aumento do ponto de amolecimento	8 max	6,8	°C
Rtfot- Ductilidade a 25GC	20 min	30	cm
Rtfot variação em % massa	-0,50 a 0,50	0,500	%
Ductilidade a 25 GC	60 min	95	Cm
Solubilidade no tricloroetileno	99,5 min	100,0	% massa
Ponto de fulgor	235 min	226	°C
Índice de suscetibilidade térmica	-1,5 a 0,7	-0,7	N/A
Densidade relativa à 20/4 °C	Anotar (1)	0,999	N/A
Aquecimento a 177 GC	NESP (2)	NESP	N/A

Fonte: Ficha técnica Refinaria Landulpho Alves (RLAM) (06/2016).

As faixas das temperaturas de usinagem e de compactação foram obtidas dentro dos limites de viscosidade estabelecidos pela norma DNIT 043/1995 e DNIT 031/2006, a partir da curva de viscosidade versus temperatura que é apresentada na Figura 10.

Figura 10: Curva de viscosidade versus temperatura do ligante.



Fonte: O autor (2017).

Sendo assim, as temperaturas de aquecimento do ligante foram fixadas em 160 °C +/- 3 °C, equivalente a viscosidade de 170 cP +/- 20 cP de compactação, bem como 146 °C +/- 2 °C, correspondente a viscosidade de 280 cP +/- 30 cP. Para o aquecimento dos agregados foi estabelecido conforme a norma, 10 °C acima da temperatura de aquecimento do ligante, ou seja 170 °C +/- 3 °C. Dessa forma encontra-se inferior a 177 °C, temperatura crítica na qual ocorre o envelhecimento do ligante.

### 3.1.2 Cinza de Algaroba

As cinzas utilizadas são provenientes do cinzeiro da fornalha de uma lavanderia tradicional, de médio porte no APL de confecções Pernambucano, situada em Caruaru-PE.

Estas são geradas com a queima da lenha de Algaroba Figura 11- A na câmara de combustão da caldeira Figura 11- B, e que, pela ação da gravidade, caem no cinzeiro Figura 11- C pelas grelhas onde é colocada a lenha e, periodicamente, recolhidas por uma caixa de coleta até que resfriem por completo, então são estocadas em sacos e tambores plásticos Figura 11- D.

Figura 11: Processo de queima da lenha de Algaroba para obtenção da cinza.



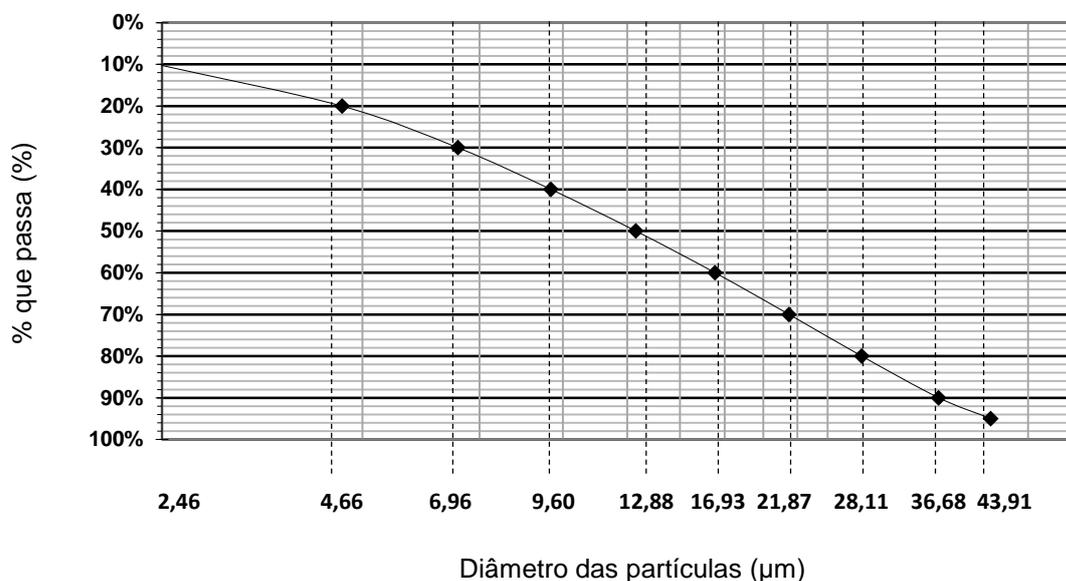
Fonte: O autor (2017).

Em seguida, estas foram transportadas para o laboratório e passadas por peneira N<sup>o</sup>10 com auxílio de peneirador elétrico para retirada de pedaços de carvão e de lenha que tiveram combustão incompleta, como uma forma rudimentar de remover impurezas da cinza.

A seguir são apresentados os métodos e parâmetros utilizados para avaliações microestruturais e caracterização da cinza de Algaroba. Estas ocorreram em conjunto com outros pesquisadores do GPEMAT e foram publicadas por Barbosa (2012), Melo (2012) e Nascimento (2014). As caracterizações foram realizadas no Laboratório de Materiais do Departamento de Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e no Laboratório de Caracterização de Materiais do CETENE (Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste) em Recife. Todos os ensaios de caracterização microestrutural ocorreram após peneiramento pela malha N<sup>o</sup>200.

A Figura 12 mostra a granulometria a laser, que indica que as partículas mais finas estão compreendidas entre 2,46 e 43,91  $\mu\text{m}$ .

Figura 12: Granulometria a laser da cinza de Algaroba que passa na peneira nº200.



Fonte: Melo, 2012 (adaptado por Moura, 2015).

### 3.1.2.1 Análise de BET (área superficial específica e porosidade das partículas)

A massa específica, área específica, porosidade e diâmetro médio das partículas menores que 75µm da cinza são apresentadas na Tabela 4 e, foram obtidas por meio do ensaio de massa específica e área específica (BET). Os resultados apontam para uma alta área superficial, o que é inerente aos materiais pulverulentos. Esta cinza apresentou uma área específica quase quatro vezes a do cimento Portland e da cal que ficam na casa dos 12.000 m<sup>2</sup>/kg e 12.500m<sup>2</sup>/kg respectivamente (NASCIMENTO, 2014).

Tabela 4: Massa específica e área específica da cinza com partículas ≤ 75µm.

Avaliação	Valor obtido no ensaio
Massa específica	2,47 g/cm <sup>3</sup>
Área específica	47.000 m <sup>2</sup> /kg
Porosidade	0,0673 cm <sup>3</sup> /g
Diâmetro médio dos poros	58,42 Å

Fonte: Melo, 2012 (adaptado por Moura, 2015).

### 3.1.2.2 Análise de FRX (fluorescência de raios-X)

A composição química da cinza investigada por FRX pode ser vista na Tabela 5. Esta é caracterizada basicamente pela alta quantidade de cálcio, acompanhado ainda de quantidades significativas de potássio, magnésio, fósforo e silício. A quantidade elevada de cálcio está relacionada ao carbonato e hidróxido de cálcio, enquanto o silício pode estar associado com a fase cristalina ou amorfa quartzo, a depender se provém da cinza e/ou de contaminações de areia na cinza (BARBOSA, 2012). A quantidade de CaO sugere a possibilidade da presença de calcita, que quando em granulometria reduzida, como é o caso das cinzas, pode contribuir para a melhora do empacotamento do sistema. A tendência é que tanto as partículas de cinza com das possíveis contaminações de areia se comportem de forma quimicamente inerte em relação a mistura e ao ligante asfáltico como observado por (XUE ET. AL. 2014).

Tabela 5: Composição química da cinza de Algaroba, em % de óxidos.

Elementos	Composição (%)
CaO	73,769
K <sub>2</sub> O	11,067
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	4,139
MgO	3,576
SO <sub>3</sub>	3,474
SiO <sub>2</sub>	2,930
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,727
TiO <sub>2</sub>	0,153
MnO	0,097
ZnO	0,031
Br	0,019
CuO	0,019

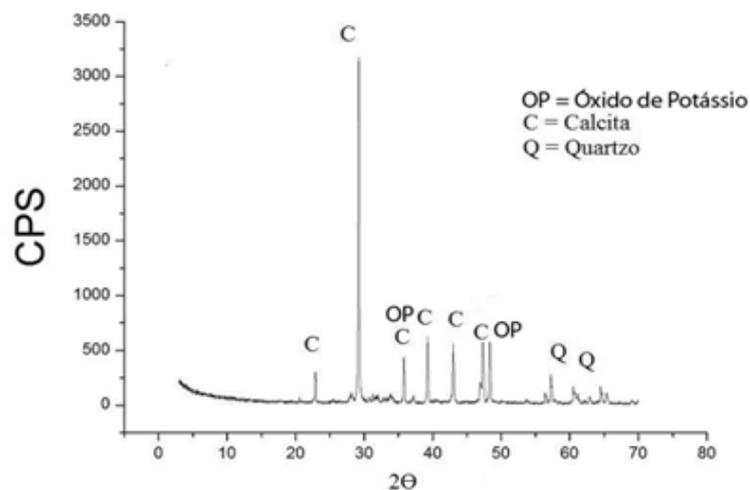
Fonte: Barbosa, 2012 (adaptado por Moura, 2015).

### 3.1.2.3 Análise de DRX (difração de raios-X)

A Figura 13 apresenta os resultados da análise por DRX da cinza. De fato, a calcita foi identificada nos resultados de DRX. Analisando os picos do difratograma verifica-se que a principal fase cristalina existente na cinza é o carbonato de cálcio, confirmando com os resultados apresentados na Tabela 5, embora também se verifique a presença de quartzo e óxido de potássio. O fato de parte da sílica ser

cristalina, uma vez que foi detectado no DRX, embasa a premissa que o material mineral é inerte em relação aos demais componentes da mistura asfáltica.

Figura 13: Difratoograma de raios-X da cinza de Algaroba.

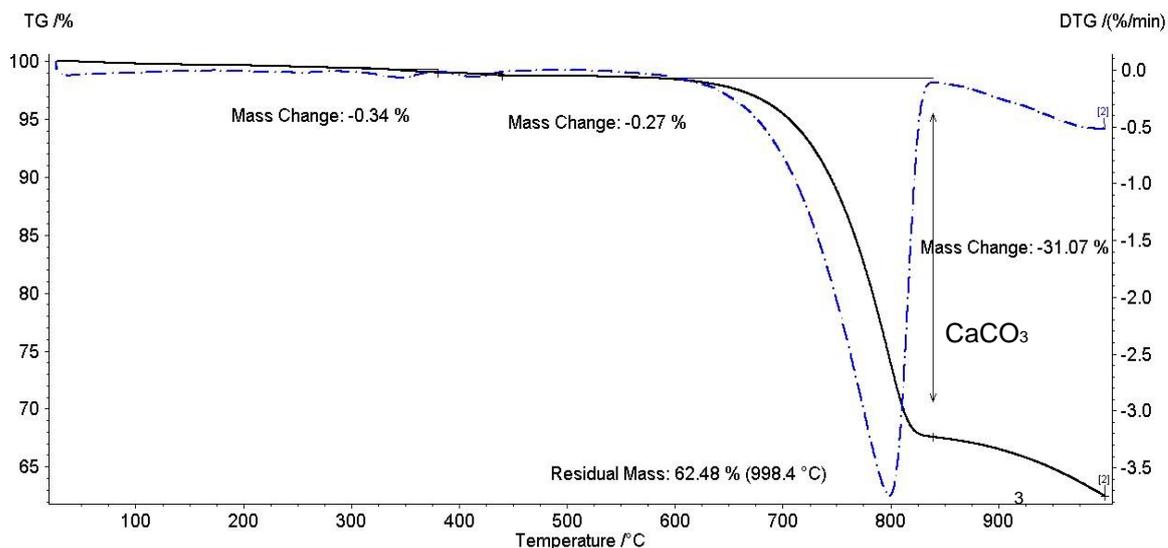


Fonte: Barbosa, 2012 (adaptado por Moura, 2015).

#### 3.1.2.4 Análise termogravimétrica

A análise termogravimétrica (Figura 14) indica a presença de uma quantidade considerável do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) na cinza de Algaroba. Como pode ser visto há uma perda de massa significativa próximo aos  $800^\circ\text{C}$  que é a temperatura do carbonato de cálcio, indicando a presença deste material. Fator esse que é positivo, pois a presença de um composto químico inerte como o carbonato de cálcio pode ser amplamente explorada com fíler em compostos cimentícios (MELO, 2012; NASCIMENTO 2014). Esta presença é positiva, pois o carbonato de cálcio é constituinte do pó calcário, que já é amplamente utilizado como fíler na indústria da pavimentação asfáltica.

Figura 14 - Análise termogravimétrica da cinza de Algaroba.

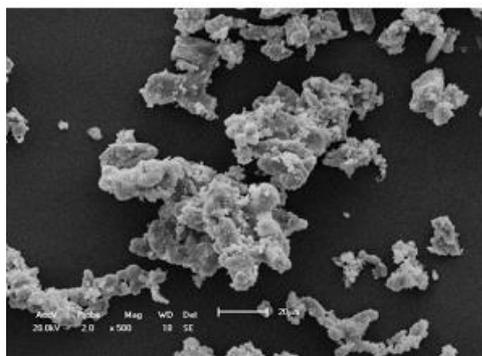


Fonte: Nascimento, 2014.

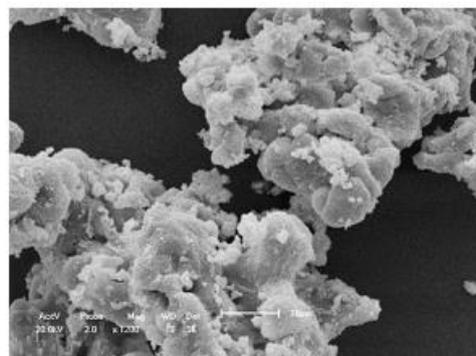
### 3.1.2.5 Análise da MEV (microscopia eletrônica de varredura)

Na Figura 15, apresentam-se as micrografias eletrônicas referentes às partículas de cinza inferiores a  $75\mu\text{m}$ . Verifica-se que a cinza apresenta aspecto irregular e poroso, sendo formada por aglomerados com uma forma predominantemente arredondada resultante da aglomeração de partículas. Ou seja, a cinza não se apresenta como partículas separadas, mas sim, como um produto sintetizado e bastante poroso em sua estrutura. O aspecto irregular pode ser visto, bem como a tendência das partículas em se aglomerar. Assim, o efeito fíler pode vir a ser minimizado pelo possível aumento no diâmetro dos aglomerados (BARBOSA, 2012).

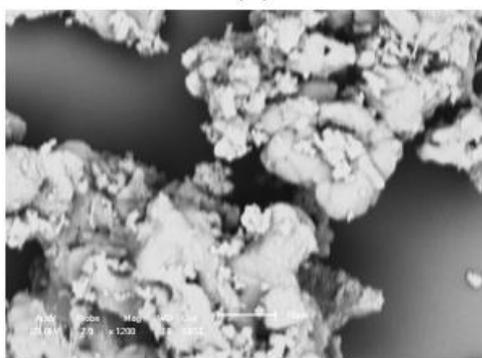
Figura 15: Microscopia eletrônica de varredura para cinza de Algaroba. (a) 500X SE, (b) 1200X SE, (c) 1200X BSE, (d) 5000X SE, (e) 12000X SE.



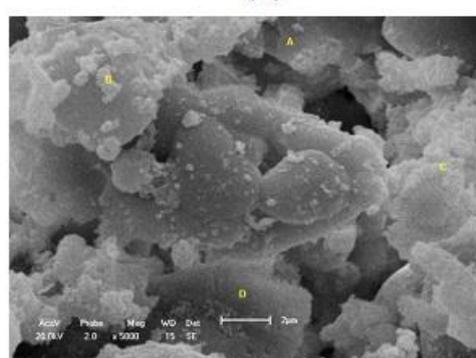
(a)



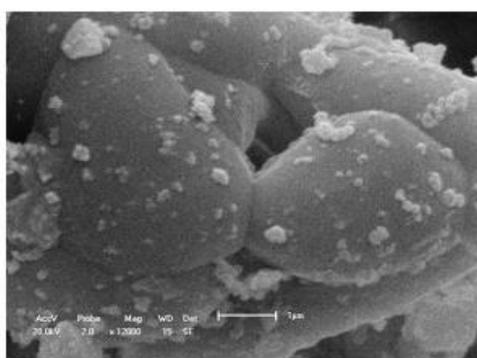
(b)



(c)



(d)



(e)

Fonte: Barbosa, 2012 (adaptado por Moura, 2015).

### 3.1.3 Agregados

Os agregados grãos e miúdos a serem empregados na fabricação do concreto betuminoso usinado a quente foram definidos de modo a satisfazer a faixa

média da granulometria do tipo “C” do manual de pavimentação (DNIT 2006), destinada para camadas de rolamento densas, muito comum na pavimentação urbana. Na pesquisa foram utilizados britas e pó de pedra graníticos provenientes da pedreira Bricar Britas Caruaru Ltda., localizada em Caruaru no agreste pernambucano.

### 3.2 Ensaios para avaliação das propriedades dos materiais

#### 3.2.1 Ensaios para caracterização dos agregados

Os agregados foram submetidos aos ensaios previstos no manual de pavimentação do DNIT (2006), com finalidade de verificar se os mesmos atendem os requisitos mínimos exigidos para o uso em concreto betuminoso usinado a quente CBUQ. Encontram-se detalhados a seguir.

##### 3.2.1.1 *Granulometria*

Os ensaios de análise granulométrica foram realizados para os agregados graúdos e miúdos de acordo com a norma do DNIT ME 083/1998 (Figura 16). Este procedimento pode ser realizado de forma manual ou mecânica, afim de obter a distribuição dos tamanhos, o módulo de finura dos agregados e dimensão máxima característica. Nesta pesquisa foi utilizado o peneiramento mecânico.

Figura 16: Peneiras com diversas aberturas.



Fonte: O autor (2017).

### 3.2.1.2 Ensaio de Abrasão “Los Angeles”

O ensaio de abrasão seguiu os parâmetros da norma DNIT ME 035/1998 determinação da abrasão “Los Angeles” Figura 17.

Figura 17: Equipamento Los Angeles.



Fonte: O autor (2017).

No ensaio o agregado é submetido a uma carga abrasiva por meio de esferas de aço, que pode variar de 6 a 12 a depender da granulometria do agregado (Tabela 6).

Tabela 6: Carga abrasiva para o ensaio de abrasão “Los Angeles”.

Graduação	Número de esferas	Massa de carga (g)
A	12	5.000 ± 25
B	11	4.584 ± 25
C	8	3.330 ± 20
D	6	2.500 ± 15
E	12	5.000 ± 25
F	12	5.000 ± 25
G	12	5.000 ± 25

Fonte: ME 035/1998 (DNIT, 1998).

O número de revoluções determinadas de 30 rpm a 33 rpm até completar 500 ou 1000 revoluções a depender da graduação do agregado (Tabela 7).

Tabela 7: Graduação para ensaio abrasão “Los Angeles”.

PENEIRAS ABERTURA EM (mm)		AMOSTRA – MASSA PARCIAL EM GRAMAS						
Passando em	Retido em	Grad. A	Grad. B	Grad. C	Grad. D	Grad. E	Grad. F	Grad. G
76	63	-	-	-	-	2500 ± 50	-	-
63	50	-	-	-	-	2500 ± 50	-	-
50	38	-	-	-	-	5000 ± 50	5000 ± 50	-
38	25	1250±25	-	-	-	-	5000 ± 25	5000 ± 25
25	19	1250±25	-	-	-	-	-	5000 ± 25
19	12,5	1250±10	2500±10	-	-	-	-	-
12,5	9,5	1250±10	2500±10	-	-	-	-	-
9,5	6,3	-	-	2500±10	-	-	-	-
6,3	4,8	-	-	2500±10	-	-	-	-
4,8	2,4	-	-	-	5000 ± 10	-	-	-
Massas totais em gramas		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10	10000±100	10000±75	10000± 50
Nº de rotações do tambor		500	500	500	500	1000	1000	1000

Fonte: ME 035/1998 (DNIT, 1998), adaptado.

O desgaste é expresso pela percentagem, em peso, do material que passa, após o ensaio, pela peneira de 1,7mm. Os resultados do ensaio são expressos com aproximação de 1%.

### 3.2.1.3 Forma das partículas

Os ensaios para definir a forma das partículas foram realizados de acordo com a metodologia da norma DNIT ME 086/1994 intitulada: "Agregado – determinação do índice de forma". A forma das partículas é caracterizada pela determinação do índice de forma (f). Esse índice varia de 0,0 a 1,0, sendo o agregado considerado de ótima cubicidade quando  $f = 1,0$  e lamelar quando  $f = 0,0$ . O limite mínimo para aceitação do agregado é de  $f = 0$ .

### 3.2.1.4 Massa específica e absorção

Os ensaios para determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo foram realizados de acordo com a metodologia da norma DNIT ME 081/1998 que, na condição saturada superficialmente seca, são passíveis de reter água.

### 3.2.1.5 *Ensaio de adesividade*

O ensaio de adesividade do agregado ao CAP seguiu as diretrizes, procedimentos e parâmetros das normas ME DNIT 078/1994 e DNIT ME 079/1994. O ensaio consiste em aferir o deslocamento numa película betuminosa que recobre o agregado, quando a mistura entre o agregado e o ligante é submetida a uma temperatura de 40 °C a ação de água destilada durante 72 horas. Na Figura 18 pode-se visualizar o agregado recoberto pelo ligante, submersos em água. O resultado é tido como satisfatório quando não é notado deslocamento do filme asfáltico ao fim de 72 horas, a partir da cura.

Figura 18: Ensaio de adesividade ao ligante asfáltico



Fonte: O autor (2017).

### 3.2.1.6 *Equivalente de areia*

O ensaio de equivalente de areia foi realizado conforme a norma DNIT ME 054/1997. Este fundamenta-se na relação volumétrica entre duas alturas de níveis, superior e inferior da suspensão argilosa numa proveta, com uma quantidade de agregado miúdo em condições estabelecidas pelo método. O resultado é expresso em porcentagem e foi utilizado pó de pedra granítica britada como agregado miúdo. O agregado miúdo deve ser um material limpo e livre de impurezas tais como: vegetação, argilas, grumos, podendo ser tolerada quantidades insignificantes. Também foi realizado para a cinza de Algaroba, para fins comparativos.

### 3.2.1.7 *Densidade real*

O método para a determinação da densidade real ou massa específica de agregados miúdos foi realizado dentro dos parâmetros da norma DNIT ME 084/1995. O método de ensaio consiste em colocar 500g de material previamente seco em estufa e resfriado em um dessecador e em seguida colocado em um picnômetro de 500 ml. Após aquecer a amostra no picnômetro, realizar a expulsão de todo ar existente esfriando em banho maria. O cálculo da massa específica dos grãos é realizado por meio da diferença de pesos do picnômetro vazio, cheio de água e com o agregado miúdo mais água.

### 3.2.1.8 *Massa específica real*

O método utilizado foi o da massa específica de solos finos e material de enchimento. Este é definido pela norma DNIT ME 085/1994, tanto para os agregados finos, como para a cinza.

## **3.3 Metodologia de dosagem**

### 3.3.1 Determinação da faixa granulométrica

A metodologia adotada para especificar as proporções da mistura ocorreu por meio do método gráfico de Rothfuchs. Este método consiste em traçar as curvas granulométricas dos materiais disponíveis para a mistura, em um gráfico que tenha sido construído de forma que, sua diagonal represente a curva média da faixa granulométrica especificada. Dessa forma, os agregados graúdos e miúdos foram utilizados em proporções tais que a mistura final se enquadrasse na faixa granulométrica C, utilizada para uma camada de rolamento de pavimento. Os limites granulométricos estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Especificações granulométricas para agregados para traço de CBUQ da faixa C.

Peneira de malha quadrada		% Faixa C	Tolerâncias
Série ASTM	Abertura (mm)		
3/4"	19,1	100	±7
1/2"	12,7	80-100	±7
3/8"	9,5	70-90	±7
N 4	4,8	44-72	±5
N 10	2,00	22-50	±5
N 40	0,42	8-26	±5
N 80	0,18	4-16	±3
N 200	0,075	2-10	±2

Fonte: Norma DNIT 031/2006 ES.

Entretanto, o fator limitante foi a máxima incorporação da cinza. Por se tratar de um método gráfico e necessitar de verificação posterior, foi estabelecido que seria adotado uma margem de meio por cento para mais e para menos na quantidade de cinza utilizada. Assim foram adotadas três distribuições granulométricas dentro da faixa granulométrica "C" do DNIT.

Os valores requeridos de ligante da mistura asfáltica pelas normas DNIT para que revestimento asfáltico atinja as características de estabilidade, devem atender os valores indicados na

Tabela 9 quanto à porcentagem de vazios, relação betume/vazios, estabilidade e resistência a tração por compressão diametral.

Tabela 9: Especificações de Concreto Asfáltico CA.

Características	Método de ensaio	Camada de Rolamento
Porcentagem de vazios, %	DNIT-ME 043/1995	3 a 5
Relação betume/vazios	DNIT-ME 043/1995	75 – 82
Estabilidade, mínima, (kgf) (75 golpes)	DNIT-ME 043/1995	500
Resistência à Tração por Compressão Diametral estática a 25°C, mínima, MPa	DNIT-ME 138/2009	0,65

Fonte: Norma DNIT 031/2006 ES.

### 3.3.2 Metodologia Marshall

A metodologia de dosagem utilizada nesta pesquisa foi a Marshall, que se fundamenta nos procedimentos que são determinados na norma (DNIT ME 043/1995, 1995) de misturas betuminosas a quente e ensaio Marshall.

Os procedimentos do método Marshall consistem em moldar, por compactação a quente, um conjunto de corpos de prova, onde a mistura dos agregados para confecção dos mesmos, é definida como a condição necessária para obtenção de um corpo de prova com 1200 g, 6,3 cm de altura e 10 cm de diâmetro. A energia de compactação empregada corpos de prova é de 75 golpes por face por meio de um compactador de laboratório tipo Marshall (Figura 19).

Figura 19: Compactador de laboratório Marshall.



Fonte: O autor (2017).

Após a compactação, as amostras repousam nos moldes ao ar livre durante 24h, e em seguida, são extraídas dos mesmos. Posteriormente, esses corpos de prova são imersos em um banho-maria a 60 °C. Após serem retirados do banho, os corpos de prova são imediatamente submetidos a uma compressão diametral, aplicada por uma prensa hidráulica Figura 20, através de um molde de compressão cilíndrico, idealizado por Marshall.

Figura 20: Prensa hidráulica para compressão diametral.



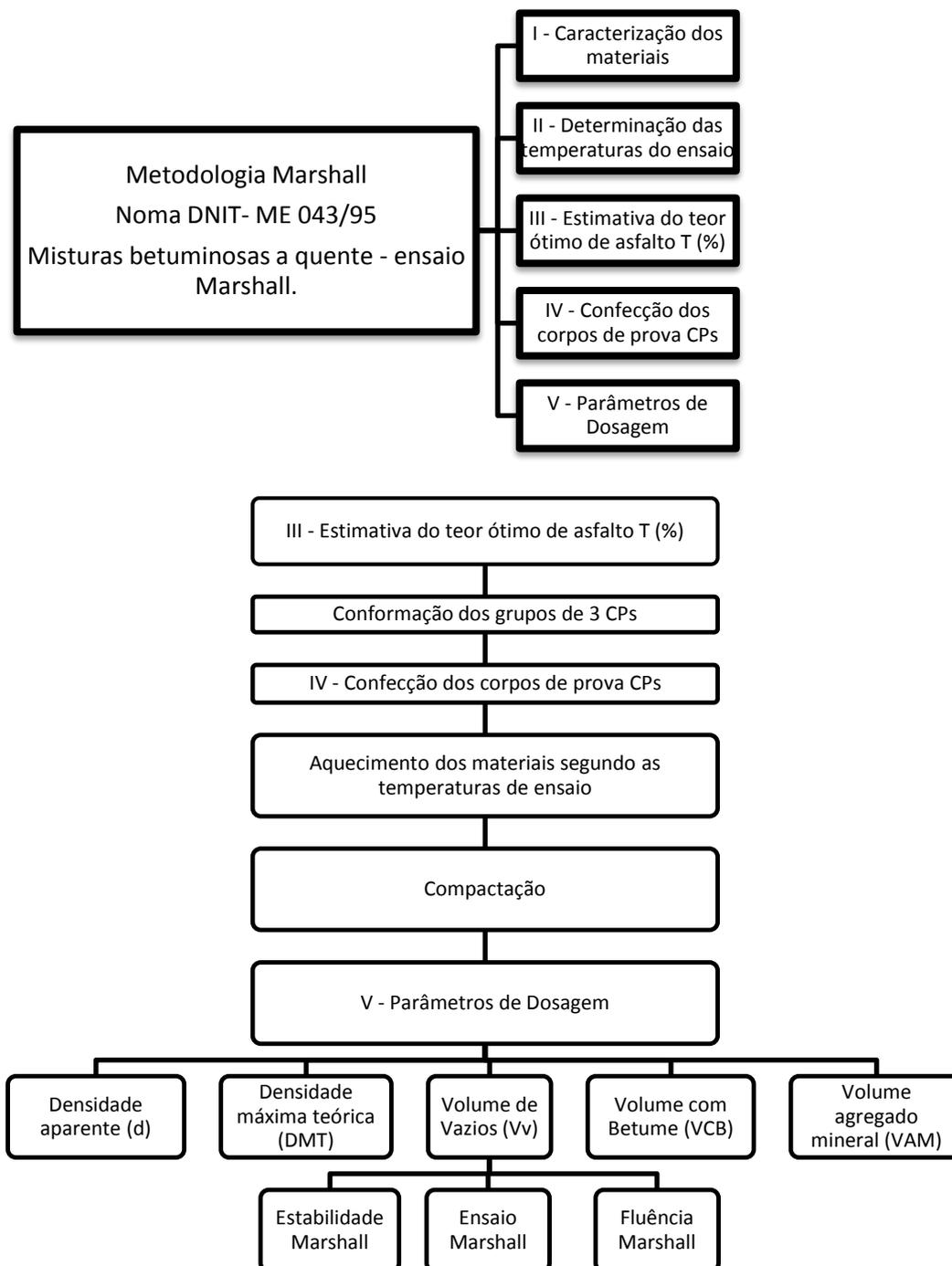
Fonte: O autor (2017).

O valor da carga máxima suportada pelos corpos de prova é conhecido como estabilidade Marshall e a deformação de ruptura como fluência. Além destes dois parâmetros, são calculados também a densidade, o volume de vazios e a relação betume/vazios, que representa a quantidade de vazios do agregado mineral preenchido por betume.

Os valores limites dos parâmetros Marshall são normalizados por diversos órgãos rodoviários. Os valores de estabilidade e fluência foram determinados a 60°C e corrigidos em função da altura ou volume do corpo de prova, conforme preconiza a metodologia (DNIT ME 043/1995, 1995): "Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall".

Na Figura 21 pode-se visualizar o fluxograma representado por Martinez (2014) que descreve de forma esquemática a metodologia Marshall.

Figura 21: Metodologia Marshall.



Martinez (2014), adaptado.

Na análise do desempenho das misturas asfálticas, por meio do método Marshall, foram realizadas quatro dosagens 0%; 3,5%; 4,0%; 4,5%, de cinza, com seis

teores de ligante asfáltico: 4,0%; 4,5%; 5,0%; 5,5%; 6,0% e 6,5%. A escolha foi baseada no fato de representarem um ponto antes e outro depois do que o proposto na literatura. Assim, pôde-se obter um intervalo mais amplo do teor de ligante. Após esse procedimento, foi descartado os teores que mais se afastavam da média, para, na sequência, se obter gráficos pautados em cinco pontos.

A dosagem Marshall foi realizada com o intuito de determinar o teor ótimo de ligante para a fabricação do concreto asfáltico.

Após análise e interpretação dos resultados, foi possível determinar para a mistura em estudo o teor de CAP de projeto, conjuntamente com a proporção dos agregados em peso e a máxima incorporação da cinza de Algaroba.

### 3.3.3 Ensaios para propriedades mecânicas

Para realização dos ensaios mecânicos, foram selecionadas três proporções de misturas diferidas pela quantidade de cinza constituinte, mantendo-se constante o melhor resultado quanto ao teor de ligante. Foram confeccionados os corpos de prova de acordo com a Tabela 10, em um total de 64 corpos de prova para a determinação das propriedades mecânicas.

Tabela 10: Quantitativo de corpos de prova para ensaios mecânicos.

Ensaio	% de cinza utilizado			
	0 % (Ref.)	3,5%	4,0%	4,5%
Fadiga	6	6	6	6
Tração	3	3	3	3
Resiliência	3	3	3	3
Lottman	4	4	4	4
Total:				64

Fonte: O autor (2017).

#### 3.3.3.1 Resistência a tração

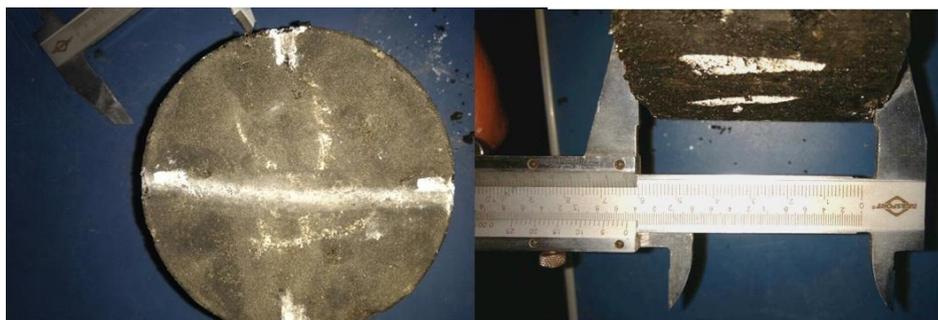
O ensaio de determinação da resistência a tração por compressão diametral foi realizado conforme padronizações da norma Brasileira DNIT ME 136/2010. Este consiste na aplicação de duas forças concêntricas e diametralmente opostas de compressão, aplicadas por frisos metálicos em um cilindro (corpo de prova), que geram tensões de tração uniformes perpendiculares ao diâmetro. Assumindo que a

ruptura do corpo de prova ocorre por tração ao longo do diâmetro, quando solicitado, as tensões geradas se igualam à tensão admissível do material que sempre deve permanecer em regime elástico linear durante o ensaio.

A resistência a tração é um importante parâmetro para a caracterização das misturas betuminosas, pois o seu resultado serve de referência para outros ensaios como os de módulo de resiliência e fadiga.

O procedimento do ensaio inicia-se pela caracterização geométrica dos corpos de prova (Figura 22), medindo a altura do corpo de prova com paquímetro, em quatro posições de forma equidistante. Após isso, adota-se a altura média das quatro leituras como o valor da altura. De forma semelhante mede-se o diâmetro do corpo de prova em três posições paralelas, adotando-se também a média das leituras como diâmetro.

Figura 22: Caracterização geométrica dos corpos de prova.



Fonte: O autor (2017).

Em seguida, colocam-se os corpos de prova em local reservado com temperatura constante de 25°C variando de 0,1°C para mais ou menos, por um período de 2 horas, de modo a se obterá a estabilização da temperatura (Figura 23).

Figura 23: Corpos de prova em repouso.



Fonte: O autor (2017).

Após esse período, o corpo de prova é colocado com sua superfície cilíndrica entre dois frisos metálicos, ajustando-se os pratos da prensa até que seja obtida uma leve compressão, capaz de manter o corpo de prova fixo no lugar, como é observado na Figura 24.

Figura 24: Realização do ensaio de resistência à tração.



Fonte: O autor (2017).

A carga foi aplicada de forma progressiva, com uma velocidade de deformação entre 0,8 a 0,1 mm/s, até que se tivesse a ruptura. Por fim, anotou-se o valor da carga de ruptura. Foram utilizados três corpos de prova e o valor médio foi admitido como o valor de resistência a tração.

### 3.3.3.2 *Módulo de resiliência*

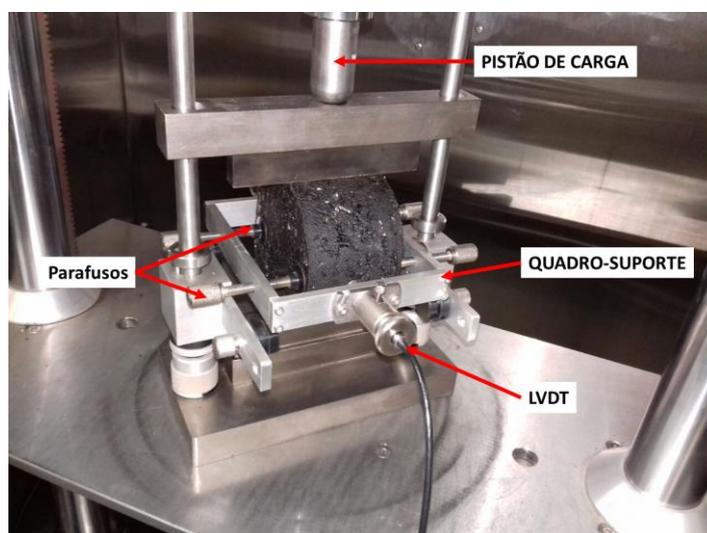
No Brasil, o ensaio de módulo de resiliência em misturas asfálticas é padronizado pela norma DNIT ME 135/2010, intitulada: "Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio". O ensaio também foi realizado seguindo a norma americana ASTM D7369 – 11.

Os ensaios por ambos os métodos são semelhantes. Diferenciando entre si, o primeiro método calcula o MR instantâneo e o outro o módulo total. Um, chamado módulo de resiliência instantâneo, que é calculado usando a deformação horizontal recuperável que ocorre durante a fase de descarregamento de um ciclo de carga descarga. Já o outro, é chamado módulo de resiliência total, e calcula-se usando a deformação total recuperável, que inclui tanto a deformação recuperável instantânea, quanto a que depende do tempo durante a fase de descarregamento ou período de repouso de um ciclo (MARQUES, 2004). Estes são computados de forma automática pelo *software UTS000 maintenance utility v 2.03* da IPC global UTS

O ensaio consiste na aplicação de duas forças concêntricas e diametralmente opostas de compressão em um cilindro que geram tensões de tração uniformes perpendiculares ao diâmetro. O primeiro passo é prender o quadro suporte, por meio de dois parafusos nas faces extremas do corpo de prova cilíndrico, que deve estar apoiado em sua superfície cilíndrica segundo uma geratriz. Em seguida, colocar o corpo de prova na base da prensa, apoiado no friso côncavo inferior, para então assentar o pistão de carga com o friso superior em contato com o mesmo, diametralmente oposto ao friso inferior. Por fim, fixar e ajustar os transdutores LVDT (*Linear Variable Diferencial Transducers*), de modo a obter o registro no microcomputador, no início da escala linear dos mesmos.

Na Figura 25, se pode ver um corpo de prova preparado para a realização do ensaio seguindo estes passos, com o indicativo de cada elemento.

Figura 25: Corpo de prova preparado para o ensaio de módulo de resiliência.



Fonte: O autor (2017).

Foi adotada uma carga de 10% do valor resistência a tração; este valor é comumente utilizado e está compreendido dentro do intervalo definido pela norma do DNIT que estabelece cargas menores que 30% da resistência a tração. Para o ensaio de módulo de resiliência foram moldados 3 (três) corpos de prova para cada amostra, sendo o valor médio admitido como o valor do módulo de resiliência.

### 3.3.3.3 *Resistência a fadiga*

O ensaio de resistência a fadiga por compressão diametral pode ser realizado por meio da tensão ou da deformação controlada. No Brasil é mais utilizado o método da deformação controlada. A carga aplicada deve induzir tensões de tração máximas da ordem de 10% a 50% do valor de resistência a tração da mistura.

O ensaio consiste na aplicação de um carregamento com duração de 0,1 segundo a 0,9 segundo de intervalo para representar o tempo de intervalo entre a aplicação de uma roda e outra. Neste tipo de ensaio a frequência pode variar entre 1 e 15 Hz, sendo o corpo de prova sujeito a um estado bi-axial de tensões (KHOSLA e OMER, 1985; PINTO, 1991 *apud* LOUREIRO, 2003).

O equipamento usado para determinação da vida de fadiga é o mesmo usado no ensaio de módulo de resiliência (UTM-25) (Figura 26). Nesta pesquisa foi utilizado cargas de 35%, 40% e 45% da resistência a tração. Adotou-se como critério de parada o valor de deformação de 4mm sofrido pelo corpo de prova em virtude das cargas aplicadas. Assim, se obtém o número de ciclos até a sua fadiga. Para o ensaio de fadiga foram moldados 2 (dois) corpos de prova para cada amostra, totalizando 6 (seis) para cada mistura avaliada. O valor médio foi admitido como o valor de resistência a fadiga.

Figura 26: Equipamento utilizado para os ensaios de fadiga e módulo de resiliência.



Fonte: O autor (2017).

#### 3.3.3.4 Resistência ao dano por umidade induzida

O ensaio Lottman Modificado, ou ensaio de umidade induzida, avalia a adesividade nas misturas asfálticas com o intuito de simular a perda de resistência ou outros danos causados pela umidade do pavimento (MARTINEZ, 2014).

Ou seja, mede a ação deletéria causada pela água na mistura asfáltica. Desta forma, o ensaio tem o objetivo de medir a resistência a tração de corpos de prova condicionados ou não a água.

O ensaio consiste em moldar e romper 4 (quatro) corpos de prova para cada teor de cinza estudado 0%; 3,5%; 4,0%; 4,5% no teor ótimo de ligante segundo a metodologia Marshall, com um índice de vazios entre 6 e 8%. Em seguida saturar 2 (dois) corpos de prova entre 70% e 90% do seu volume de vazios com água (Figura 27-b), após isso colocá-los em um local refrigerado com temperatura de  $-18^{\circ}\text{C}$  durante 15 horas (Figura 27 d). Após isso os corpos de prova devem ser colocados em banho maria a temperaturas de  $60^{\circ}\text{C}$  por 24 horas (Figura 27-e), e em seguida por 2 horas em um banho maria de  $25^{\circ}\text{C}$ . Outros 2 (dois) corpos de prova não vem a ser submetidos a acondicionamento (Figura 27).

Figura 27: Sequência do procedimento para realização do ensaio Lottman.



(a) Aplicação da pressão para saturação dos CP



b) Saturação dos Corpos de Prova



(c) Colocação do CP em sacos com 10 ml de água



(d) CP condicionados à temperatura de  $-18^{\circ}\text{C}$



(e) imersão dos CP a banho de  $60^{\circ}\text{C}$  por 24h



(f) Realização da RT a  $25^{\circ}\text{C}$  após condicionamento

Fonte: Santos (2012).

Por fim, foi realizado o ensaio de resistência a tração por compressão diametral (Figura 27-f) . Para uma mistura ser considerada aprovada, os corpos de prova condicionados a água, devem atingir no mínimo 70% da resistência a tração dos corpos de prova não condicionados.

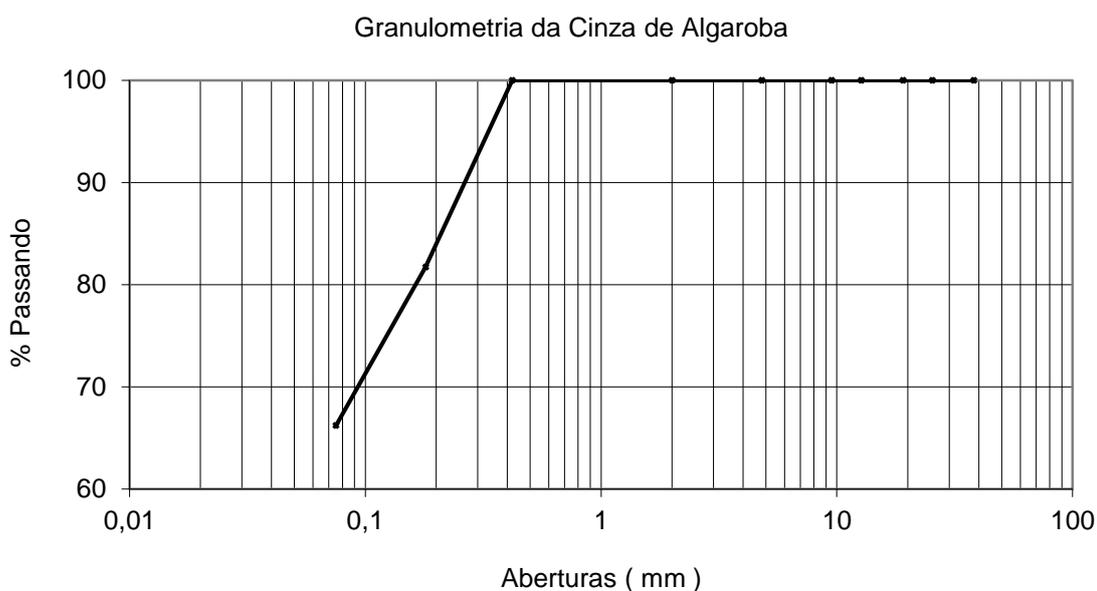
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Caracterização da cinza de algaroba

#### 4.1.1 Caracterização granulométrica da cinza de Algaroba

Após coleta e transporte da cinza de Algaroba, a mesma cinza foi submetida ao processo de peneiramento com o intuito de obter-se a sua composição granulométrica, que está representada na Figura 28.

Figura 28: Curva granulométrica da cinza de Algaroba.



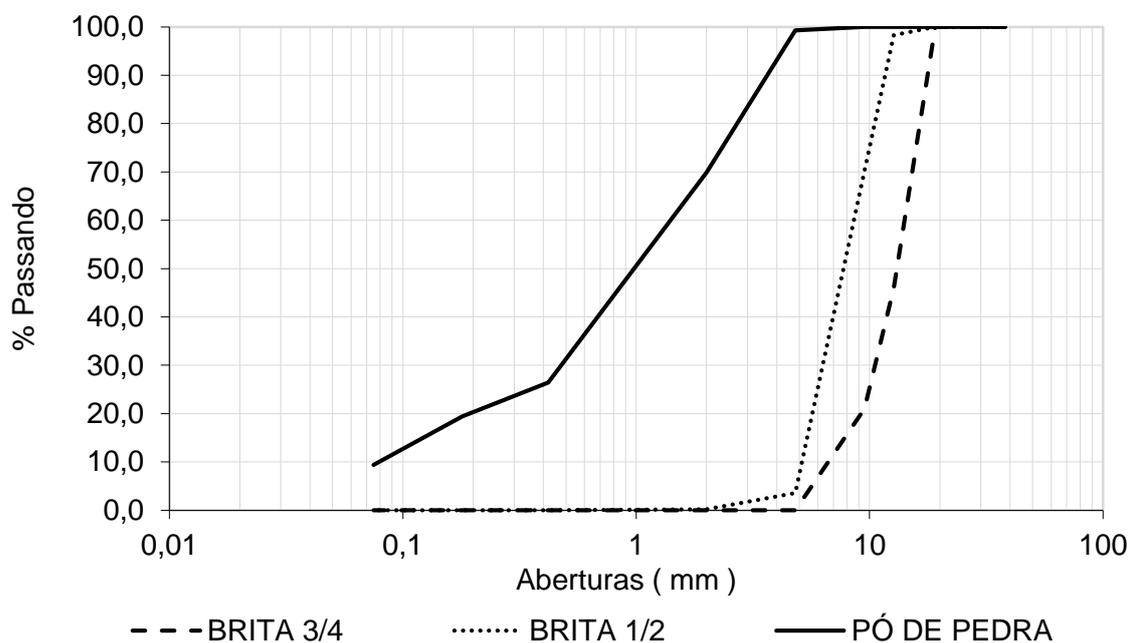
Fonte: O autor (2017).

Nota-se que a cinza passa 100% na peneira de abertura 0,42 mm, e 66,2% passando pela peneira de malha 0,075 mm, o que atendeu ao requisito mínimo de 65% passando nessa malha para ser considerado fíler (DNIT EM 367/97, 1997). Entretanto, esta também estabelece que passe entre 95% a 100% pela peneira de abertura 0,18 mm, que neste caso foi obtido aproximadamente 82%. Isto implica que uma parte da cinza estará contribuindo simultaneamente como fíler, e uma pequena parcela como agregado miúdo.

## 4.2 Caracterização dos agregados

A Figura 29 apresenta o gráfico da granulometria dos agregados. O pó de pedra apresentou boa graduação, tendo frações em todas as faixas as quais se destina. Os agregados graúdos ficaram dentro das especificações de brita  $\frac{3}{4}$  e  $\frac{1}{2}$  respectivamente.

Figura 29: Composição granulométrica dos agregados.



Fonte: O autor (2017).

Nas tabelas de Tabela 11 a Tabela 14 são apresentadas as graduações de cada material constituinte da mistura das composições na faixa “c”.

Tabela 11: Composição granulométrica da mistura com 0% de cinza de Algaroba.

PENEIRAS	BRITA 3/4		BRITA 1/2		PÓ DE PEDRA		CINZA		FAIXA "C"		
	15,0%	% MIST.	30,0%	% MIST	55,0%	% MIST.	0%	% MIST.	FAIXA "C" MIN.	OBTIDA	FAIXA "C" MÁX.
	% PASS.	15,0 %	%PASS	30,0%	% PASS.	55%	% PASS.	0%			
1"	100,00	15,0	100,0	30,0	100,0	55,0			100	100,0	100
3/4"	100,00	15,0	100,0	30,0	100,0	55,0			100	100,0	100
1/2"	46,00	6,9	98,3	29,5	100,0	55,0			80	90,0	100
3/8"	21,00	3,2	70,2	21,1	100,0	55,0			70	78,5	90
4	0,00	0,0	3,6	1,1	99,3	54,6			44	55,7	72
10	0,00	0,0	0,2	0,1	69,9	38,4			22	38,5	50
40	0,00	0,0	0,0	0,0	26,4	14,5			8	14,5	26
80	0,00	0,0	0,0	0,0	19,4	10,7			4	10,7	16
200	0,00	0,0	0,0	0,0	9,4	5,2			2	5,2	10

Fonte: O autor (2017).

Tabela 12: Composição granulométrica da mistura com 3,5% de cinza de Algaroba.

PENEIRAS	BRITA 3/4		BRITA 1/2		PÓ DE PEDRA		CINZA		FAIXA "C"		
	12,0%	% MIST.	30,0%	% MIST	54,5%	% MIST.	3,5%	% MIST.	FAIXA "C" MIN.	OBTIDA	FAIXA "C" MÁX.
	% PASS.	12,0%	%PASS	30,0%	% PASS.	55%	% PASS.	3,5%			
1"	100,00	12,0	100,0	30,0	100,0	54,5	100,0	3,5	100	100,0	100
3/4"	100,00	12,0	100,0	30,0	100,0	54,5	100,0	3,5	100	100,0	100
1/2"	46,00	5,5	98,3	29,5	100,0	54,5	100,0	3,5	80	93,0	100
3/8"	21,00	2,5	70,2	21,1	100,0	54,5	100,0	3,5	70	81,5	90
4	0,00	0,0	3,6	1,1	99,3	54,1	100,0	3,5	44	58,7	72
10	0,00	0,0	0,2	0,1	69,9	38,1	100,0	3,5	22	41,7	50
40	0,00	0,0	0,0	0,0	26,4	14,4	100,0	3,5	8	17,9	26
80	0,00	0,0	0,0	0,0	19,4	10,6	81,7	2,9	4	13,4	16
200	0,00	0,0	0,0	0,0	9,4	5,1	66,2	2,3	2	7,4	10

Fonte: O autor (2017).

Tabela 13: Composição granulométrica da mistura com 4,0% de cinza de Algaroba.

PENEIRAS	BRITA 3/4		BRITA 1/2		PÓ DE PEDRA		CINZA		FAIXA "C"		
	12,0%	% MIST.	30,0%	% MIST	54,0%	% MIST.	4,0%	% MIST.	FAIXA "C"	OBTIDA	FAIXA "C"
	% PASS.	12,0%	%PASS	30,0%	% PASS.	54%	% PASS.	4%	MIN.		MÁX.
1"	100,00	12,0	100,0	30,0	100,0	54,0	100,0	4,0	100	100,0	100
3/4"	100,00	12,0	100,0	30,0	100,0	54,0	100,0	4,0	100	100,0	100
1/2"	46,00	5,5	98,3	29,5	100,0	54,0	100,0	4,0	80	93,0	100
3/8"	21,00	2,5	70,2	21,1	100,0	54,0	100,0	4,0	70	81,5	90
4	0,00	0,0	3,6	1,1	99,3	53,6	100,0	4,0	44	58,7	72
10	0,00	0,0	0,2	0,1	69,9	37,7	100,0	4,0	22	41,8	50
40	0,00	0,0	0,0	0,0	26,4	14,3	100,0	4,0	8	18,3	26
80	0,00	0,0	0,0	0,0	19,4	10,5	81,7	3,3	4	13,7	16
200	0,00	0,0	0,0	0,0	9,4	5,1	66,2	2,6	2	7,7	10

Fonte: O autor (2017).

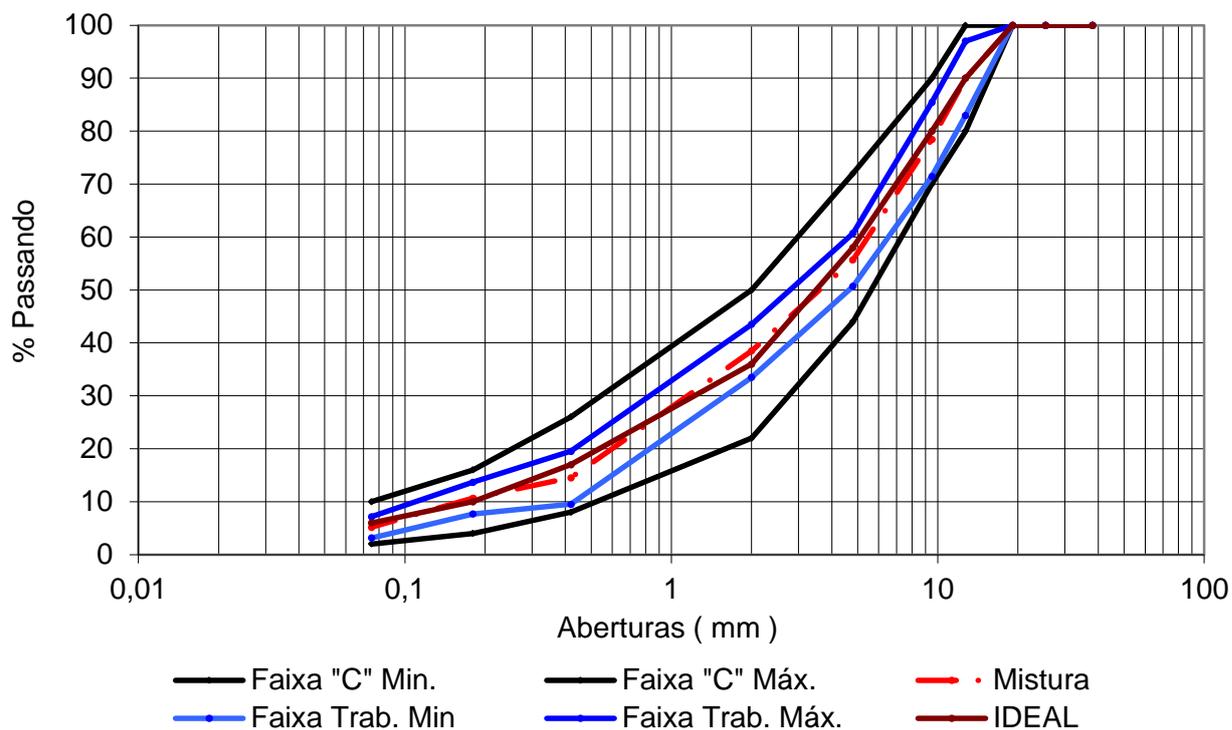
Tabela 14: Composição granulométrica da mistura com 4,5% de cinza de Algaroba.

PENEIRAS	BRITA 3/4		BRITA 1/2		PÓ DE PEDRA		CINZA		FAIXA "C"		
	12,0%	% MIST.	30,0%	% MIST	53,5%	% MIST.	4,5%	% MIST.	FAIXA "C"	OBTIDA	FAIXA "C"
	% PASS.	12,0%	%PASS	30,0%	% PASS.	54%	% PASS.	4,5%	MIN.		MÁX.
1"	100,00	12,0	100,0	30,0	100,0	53,5	100,0	4,5	100	100,0	100
3/4"	100,00	12,0	100,0	30,0	100,0	53,5	100,0	4,5	100	100,0	100
1/2"	46,00	5,5	98,3	29,5	100,0	53,5	100,0	4,5	80	93,0	100
3/8"	21,00	2,5	70,2	21,1	100,0	53,5	100,0	4,5	70	81,5	90
4	0,00	0,0	3,6	1,1	99,3	53,1	100,0	4,5	44	58,7	72
10	0,00	0,0	0,2	0,1	69,9	37,4	100,0	4,5	22	42,0	50
40	0,00	0,0	0,0	0,0	26,4	14,1	100,0	4,5	8	18,6	26
80	0,00	0,0	0,0	0,0	19,4	10,4	81,7	3,7	4	14,1	16
200	0,00	0,0	0,0	0,0	9,4	5,0	66,2	3,0	2	8,0	10

Fonte: O autor (2017).

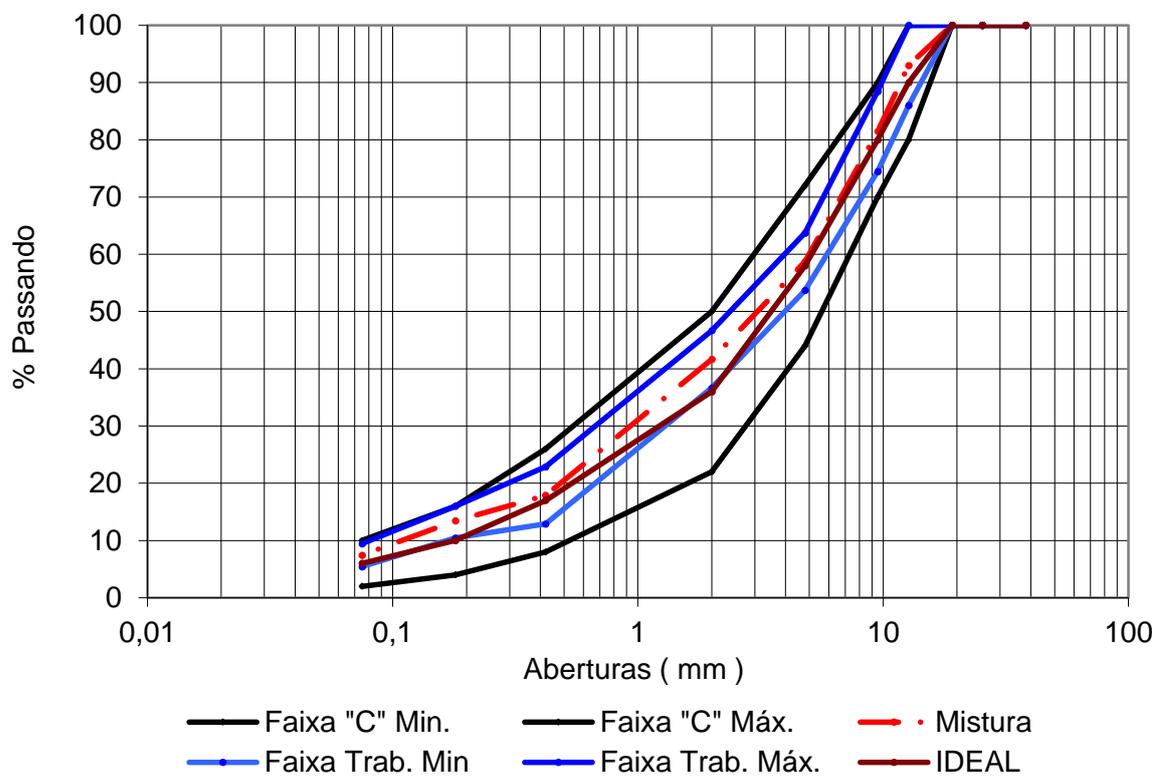
Nas figuras de Figura 30 a Figura 33 são apresentadas as curvas granulométricas para cada adição de cinza (0%, 3,5%, 4% e 4,5) e indicativos da curva ideal, das curvas faixa "c" máximo e mínimo e faixas de trabalho máximo e mínimo.

Figura 30: Curva granulométrica, faixa "C" com 0% de cinza.



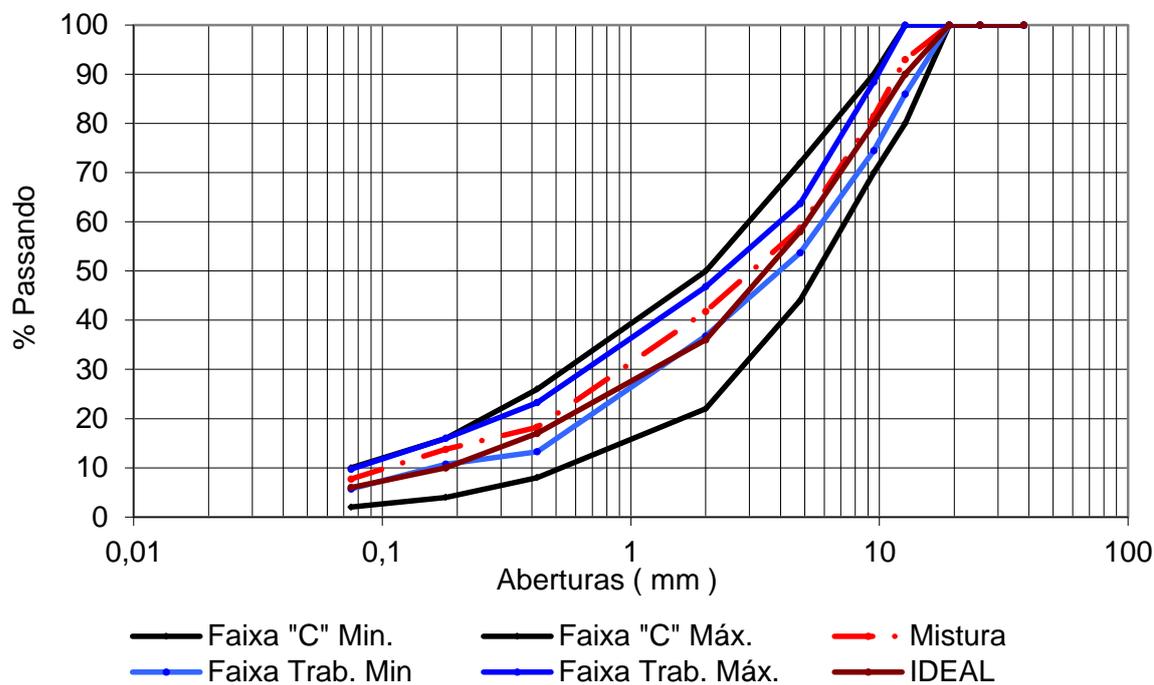
Fonte: O autor (2017).

Figura 31: Curva granulométrica, faixa "C" com 3,5% de cinza.



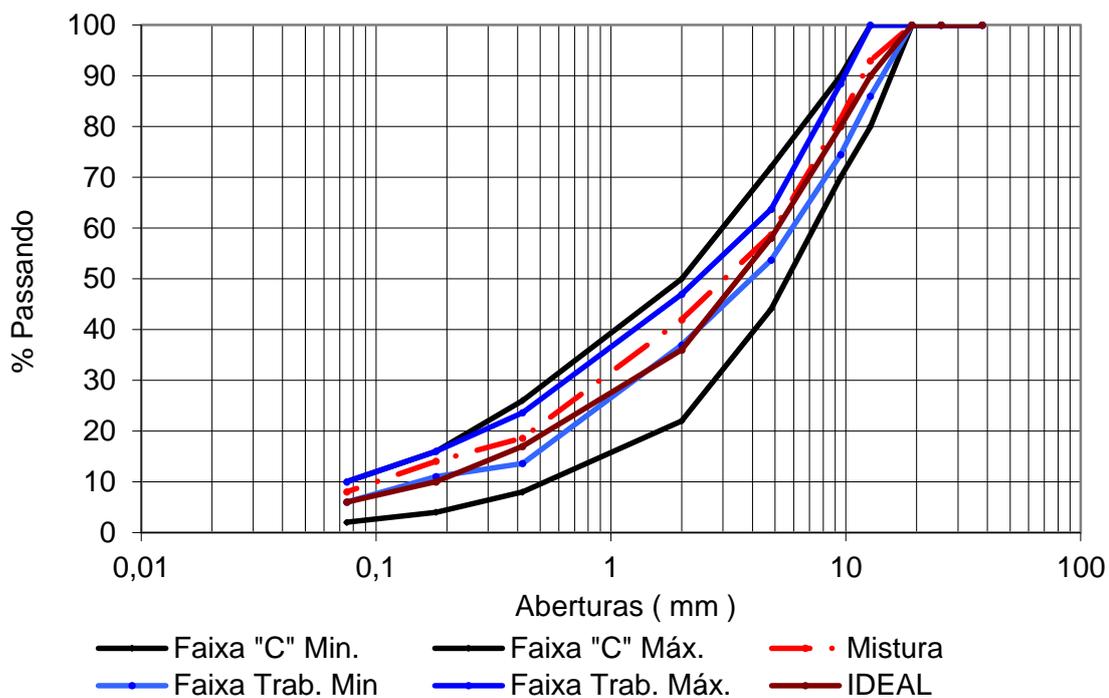
Fonte: O autor (2017).

Figura 32: Curva granulométrica, faixa "C" com 4,0% de cinza.



Fonte: O autor (2017).

Figura 33: Curva granulométrica, faixa "C" com 4,5% de cinza.



Fonte: O autor (2017).

Os resultados dos ensaios realizados nos agregados graúdos e miúdos, utilizados na dosagem e confecção dos concretos asfálticos, encontram-se compilados na Tabela 15.

Tabela 15: Caracterização física dos agregados.

Ensaio	Norma de ensaio (DNIT-ME)	Unidade	Especificação	Obtido
Abrasão Los Angeles - Brita 19	035/98	%	máx 50	33
Abrasão Los Angeles - Brita 12	035/98	%	máx 50	34
Índice de forma - Brita 19	086/94	IF	> 0,5	0,62
Índice de forma - Brita 12	086/94	IF	> 0,5	0,59
Densidade real - Brita 19	081/98	g/cm <sup>3</sup>	----	2,66
Densidade real - Brita 12	081/98	g/cm <sup>3</sup>	----	2,67
Absorção - Brita 19	081/98	%	----	0,36
Absorção - Brita 12	081/98	%	----	0,52
Adesividade do agregado ao betume (CAP puro) - Brita 19	078/94	Qualitativa	Satisfatória	Satisfatória
Adesividade do agregado ao betume (CAP puro) - Brita 12	078/94	Qualitativa	Satisfatória	Satisfatória
Equivalente de areia - Pó de pedra	054/97	%	min 55%	56%
Equivalente de areia - Cinza	054/97	%	min 55%	67%
Densidade real - Pó de Pedra	084/95	g/cm <sup>3</sup>	----	2,69
Densidade real - Cinza	085/94	g/cm <sup>3</sup>	----	2,47

Fonte: O autor (2017).

Os resultados de abrasão “Los Angeles” apresentaram uma perda de 33%, para o agregado graúdo de  $\frac{3}{4}$  e de 34,0% para o de  $\frac{1}{2}$ , sendo dado como satisfatórios por serem valores inferiores ao valor máximo de 50% que é estabelecido na norma do DNIT 031/2006 para a fabricação de camadas de rolamento de concreto asfáltico.

Quanto à forma das partículas, constatou-se a forma cúbica, pelo fator forma ser superior a 0,5 tanto para a brita 19 como para a brita 12. A presença de partículas cúbicas irregulares indica melhor intertravamento entre os grãos de agregados após a compactação, evitando a quebra dos agregados na mistura (MARTINEZ,2014).

No ensaio de adesividade, o ligante obteve resultados satisfatórios segundo o método de avaliação da norma DNIT 078/1994, dado que não se observou deslocamento das películas betuminosas, como pode ser observado na Figura 34.

Figura 34: Ensaio de adesividade o ligante.



Fonte: O autor (2017).

Conforme pode ser visto na Tabela 15, as demais características dos agregados graníticos britados são apresentadas. A cinza de Algaroba também apresentou, o equivalente de areia de 67% (min 55%) e massa específica real de 2,47 g/cm<sup>3</sup>.

### 4.3 Metodologia de dosagem Marshall

Foram moldadas três amostras por traço, totalizando 72 amostras, como se pode visualizar na Tabela 16.

Tabela 16: Quantitativo de Corpos de Prova para ensaio Marshall.

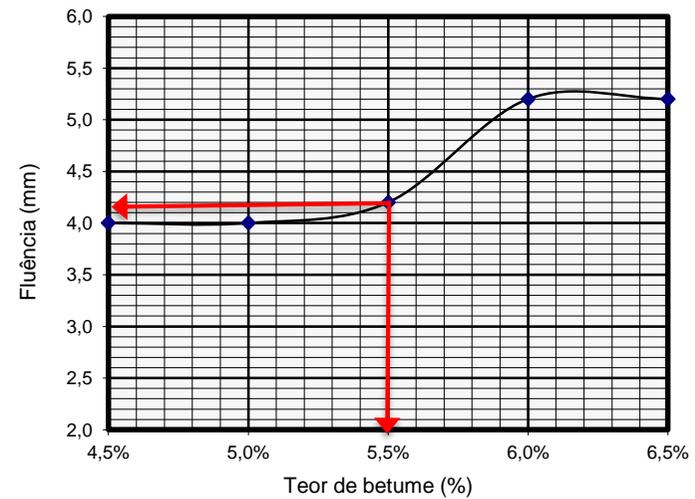
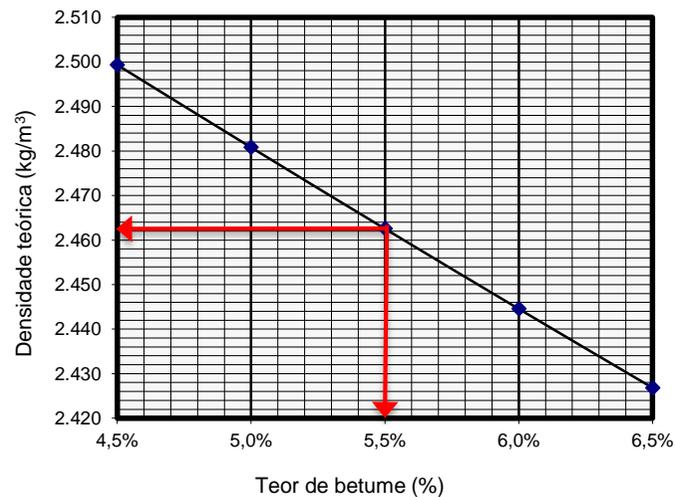
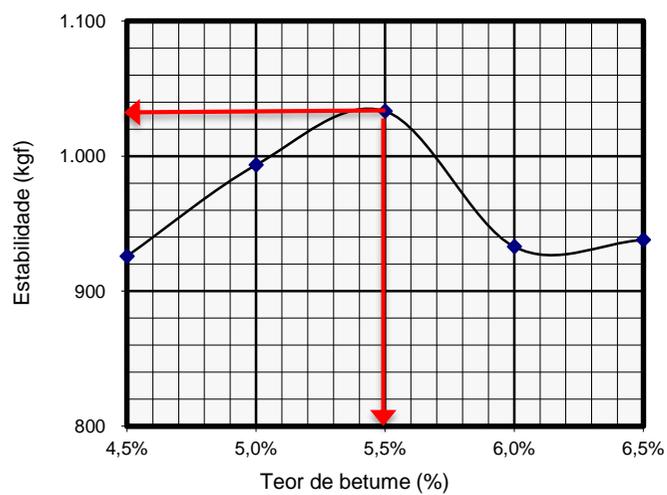
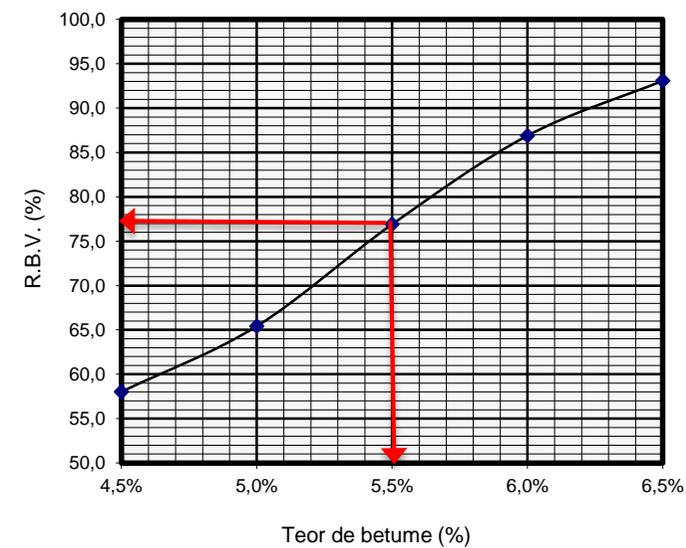
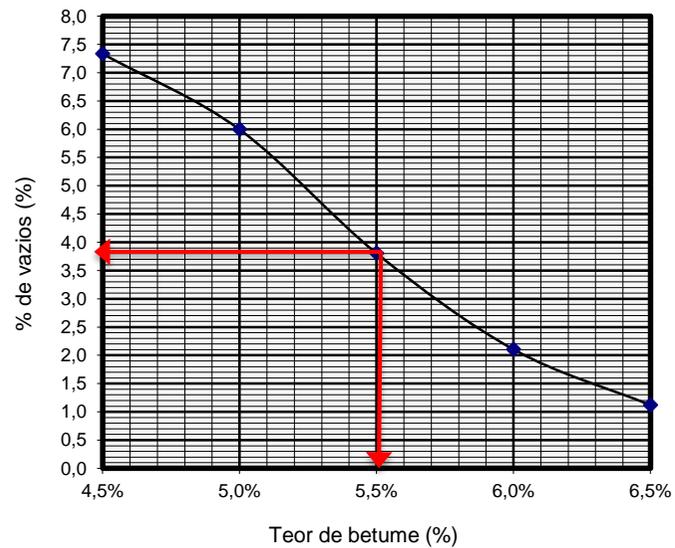
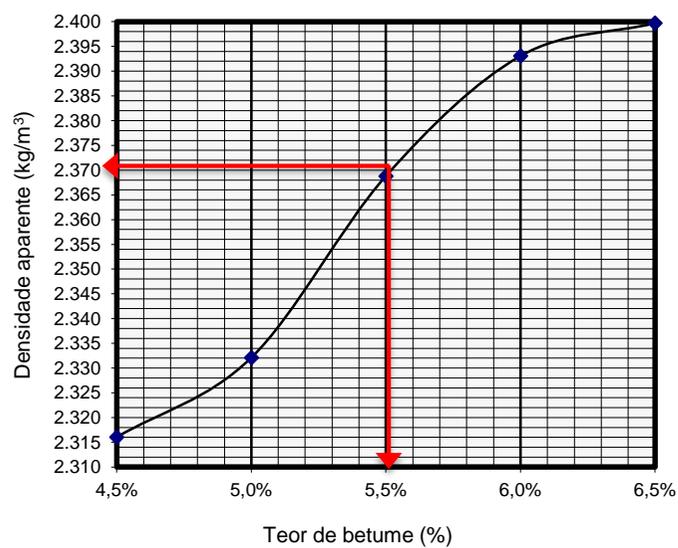
Teor de CAP	% de cinza utilizado			
	0 % (Ref.)	3,5%	4,0%	4,5%
4,0%	3	3	3	3
4,5%	3	3	3	3
5,0%	3	3	3	3
5,5%	3	3	3	3
6,0%	3	3	3	3
6,5%	3	3	3	3
			Total:	72

Fonte: O autor (2017).

Os gráficos relativos aos parâmetros de dosagem Marshall se encontram expostos nas Figura 35 (para 0% de adição de cinza de Algaroba), Figura 36 (para 3,5% de adição), Figura 37 (para 4,0% de adição) e Figura 38 (para 4,5% de adição). Nestes são apresentados os resultados de densidade teórica e aparente, porcentagem de vazios, relação betume vazios, estabilidade e fluência para obtenção do valor ótimo de ligante asfáltico.

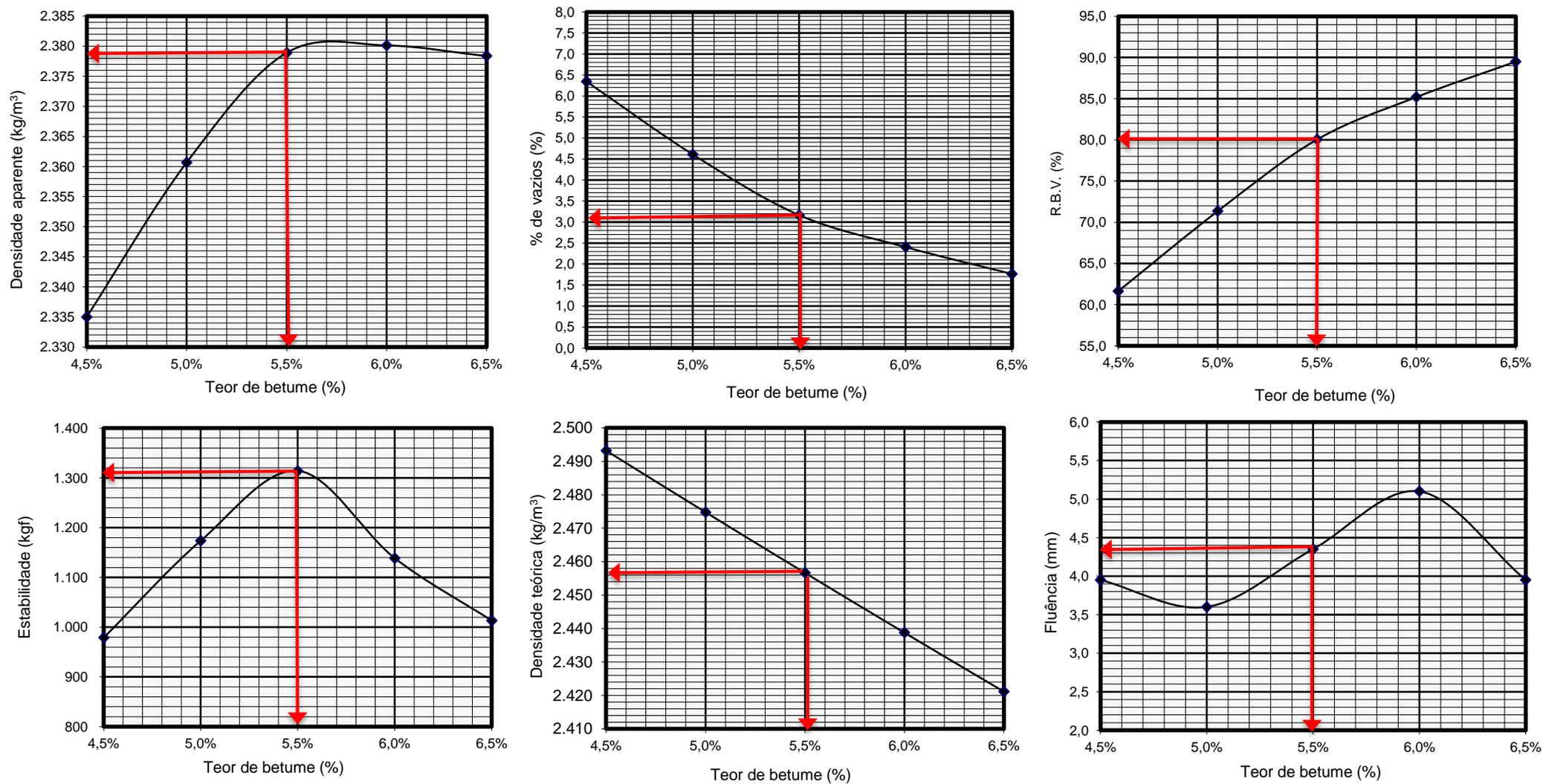
Como pode ser visualizado na Figura 35 (para 0% de adição de cinza de Algaroba), Figura 36 (para 3,5% de adição), Figura 37 (para 4,0% de adição) e Figura 38 (para 4,5% de adição), todas as misturas estudadas, tanto a de referência como as com adição de cinza, apresentaram os melhores valores dos parâmetros volumétricos para 5,5% de teor de ligante. Assim, o teor de ligante ótimo é de 5,5% para todos as misturas.

Figura 35: Parâmetros de dosagem para 0% de adição de cinza de Algaroba.



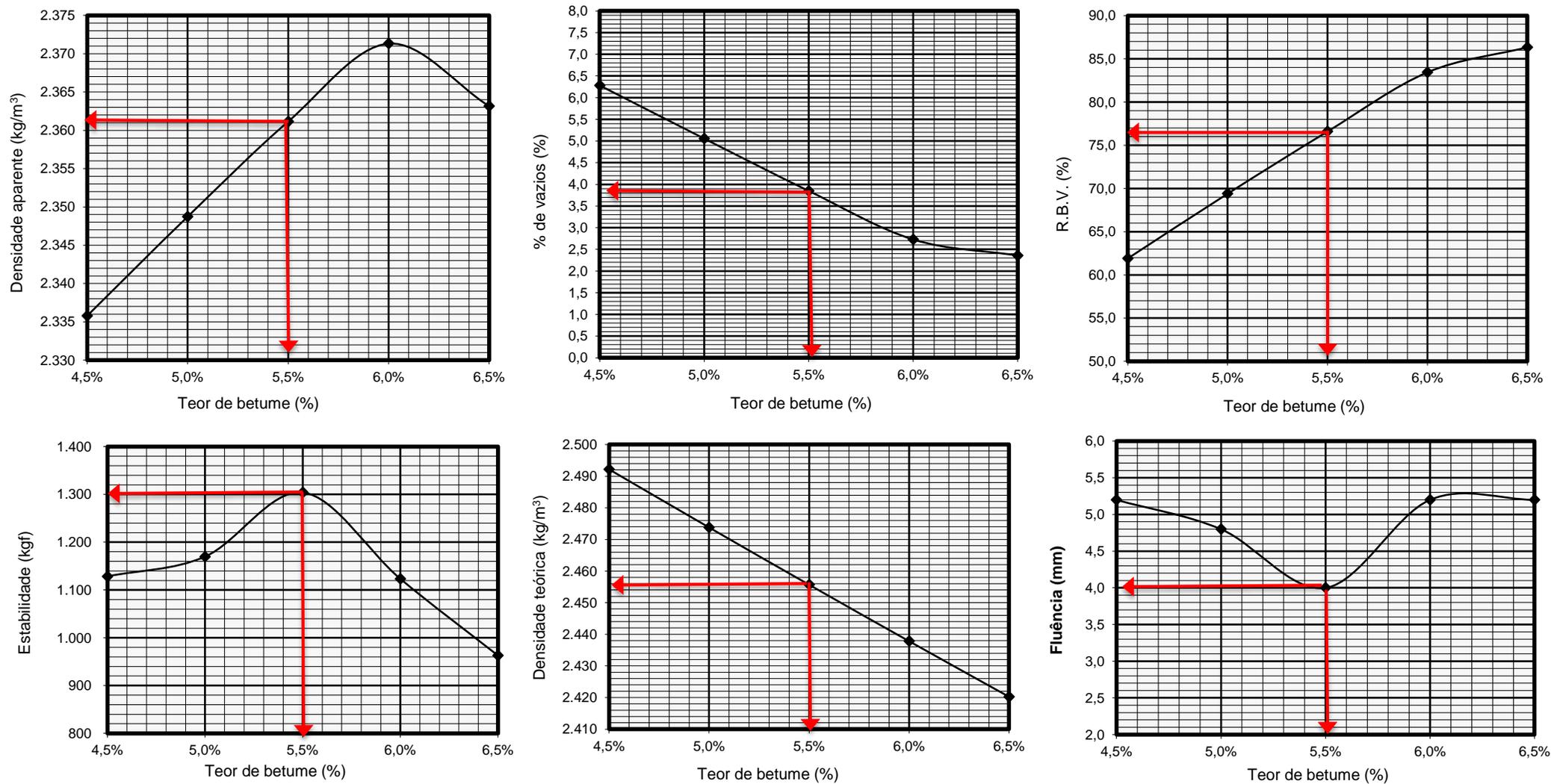
Fonte: O autor (2017).

Figura 36: Parâmetros de dosagem para 3,5% de adição de cinza de Algaroba.



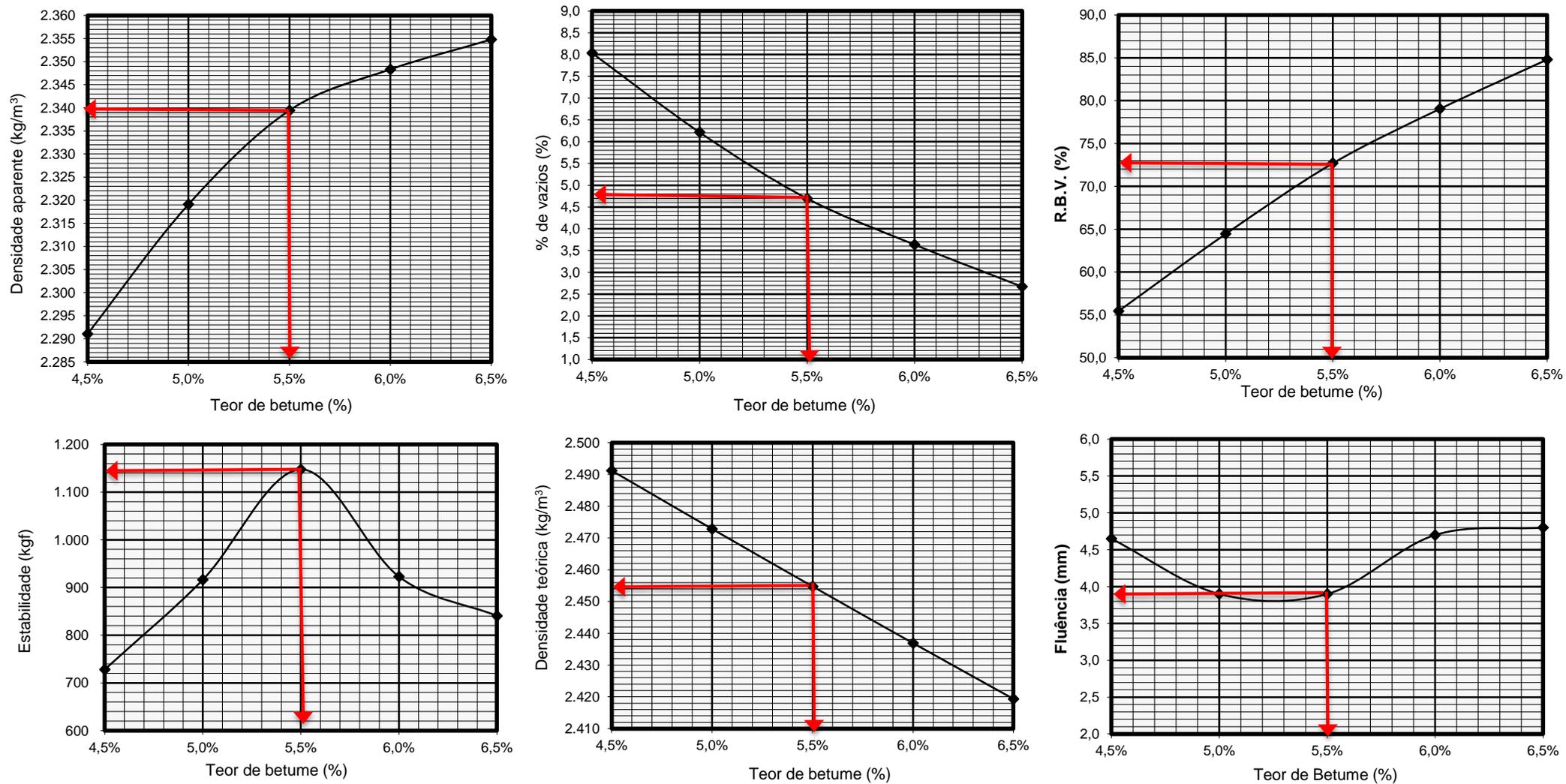
Fonte: O autor (2017).

Figura 37: Parâmetros de dosagem para 4,0% de adição de cinza de Algaroba.



Fonte: O autor (2017).

Figura 38: Parâmetros de dosagem para 4,5% de adição de cinza de Algaroba.



Fonte: O autor (2017).

Com o valor de ligante fixado em 5,5%, pode-se discorrer quanto a variação dos parâmetros volumétricos levando apenas em consideração o teor de cinza adicionado. Na Tabela 17 estão compilados os parâmetros volumétricos a partir do teor ótimo de ligante. Apenas o valor de R.B.V. está fora de faixa para 4,5% de cinza, pois um teor maior de ligante colocaria a fluência fora de faixa.

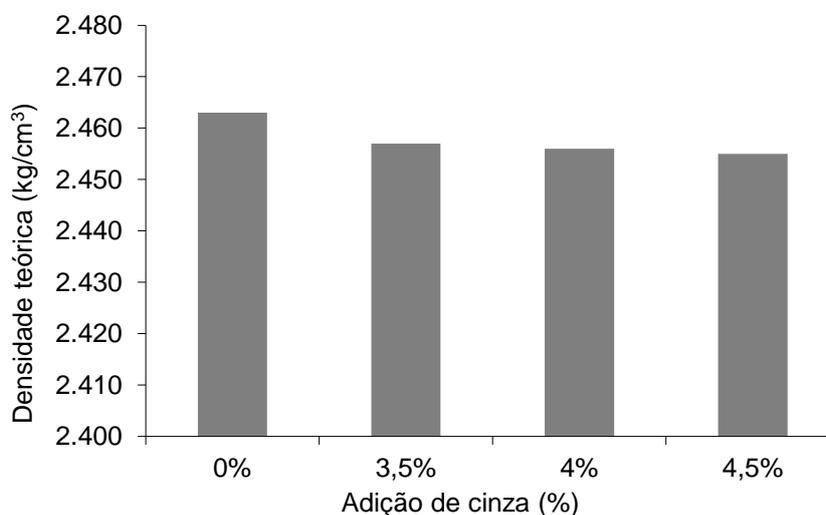
Tabela 17: Parâmetros Metodologia Marshall.

Teor de cinza (%)	0,0%	3,5%	4,0%	4,5%	Especificações DNIT- Faixa "C"
Dens. Teórica (kg/cm <sup>3</sup> )	2463	2457	2456	2455	-
Dens. Aparente (kg/cm <sup>3</sup> )	2369	2379	2361	2339	-
% de vazios (%)	3,81	3,17	3,85	4,7	3 - 5
R.B.V. (%)	76,9	80,05	76,6	72,7	75 - 82
Estabilidade min. (kgf)	1033	1314	1304	1148	≥ 500
Fluência (mm)	4,2	4,35	4,0	3,9	2 - 4,5

Fonte: O autor (2017).

A Figura 39, mostra que as densidades teóricas das misturas com adição de cinza são levemente menores que as de referência, o que já era previsível, haja vista que a cinza tem densidade menor que os demais agregados. Entretanto esta variação não interfere nas propriedades por não ser significativa. Outros autores que adicionaram fíler também reportam reduções nesse parâmetro (LIKITLERSUANG e CHOMPOORAT, 2016; AZZAM *et al.*, 2016).

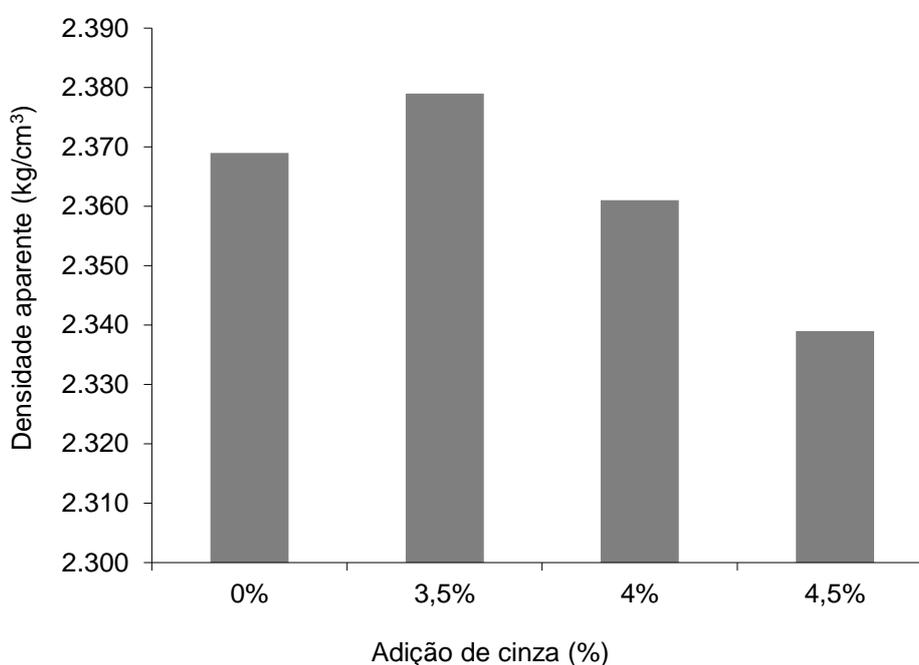
Figura 39: Variação da densidade teórica nas misturas com adição com cinza.



Fonte: O autor (2017).

Com relação a densidade aparente, a mistura com adição de cinza de 3,5% obteve melhor desempenho como pode ser visto na Figura 40. Tal resultado levanta a hipótese de que as partículas finas de cinza teriam preenchido os vazios na proporção de 3,5% pelo princípio da otimização da compacidade; já para adições superiores seria atingido um grau de saturação de finos. Este comportamento pode ser devido o filler pode preencher os vazios e aumentar a densidade da mistura (LIKITLERSUANG e CHOMPOORAT, 2016).

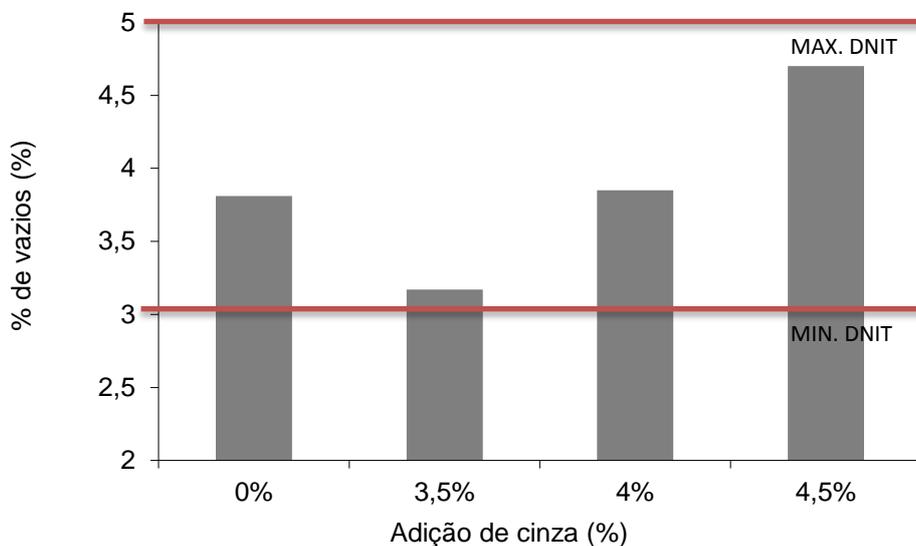
Figura 40: Variação da densidade aparente nas misturas com adição com cinza.



Fonte: O autor (2017).

Tal hipótese pode ser confirmada diante do resultado da porcentagem de vazios apresentada na Figura 41, onde mostra que esse sistema com adição de 3,5% de cinza tem maior compacidade, apresentando % de vazios de 3,17%, comparativamente a 3,81% para 0% de adição de cinza, 3,85% para 4,0% de adição de cinza e 4,7% para 4,5% de adição de cinza. Para adições de 4,0% e 4,5% houve redução na densidade aparente.

Figura 41: Variação da porcentagem de vazios nas misturas com adição com cinza.



Fonte: O autor (2017).

Os quatro tipos de misturas, tanto a de referência quanto as adicionadas de cinza cumprem satisfatoriamente os requisitos da norma DNIT ES 31/2006 quanto ao volume de vazios compreendidos entre 3 e 5%, como pode ser visto na Figura 41.

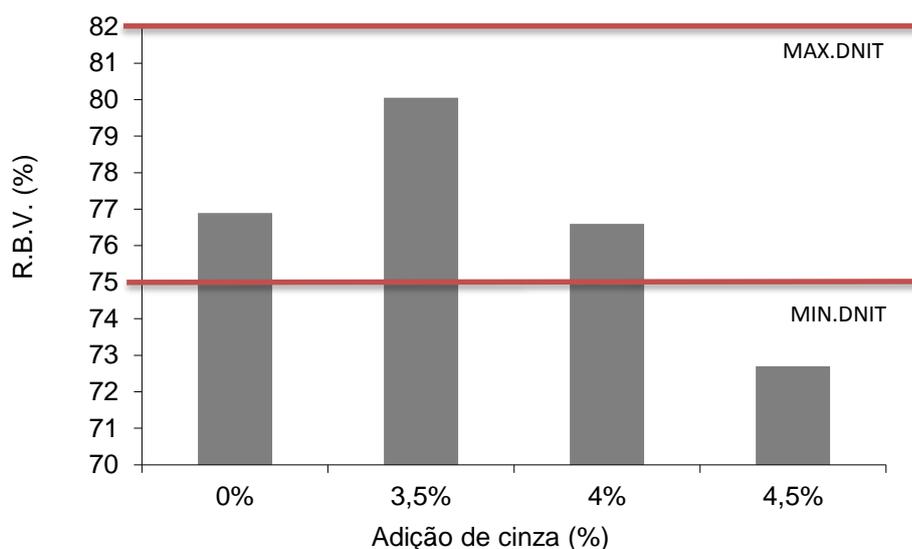
Segundo Martinez (2014) as misturas asfálticas que apresentem maior volume de vazios mostram uma maior tendência ao envelhecimento do ligante asfáltico, pois o ar que está presente nos vazios propicia uma aceleração o processo de oxidação do asfalto. Neste aspecto, pode-se destacar, com base na % de vazios, que a adição de cinza de Algaroba em porcentagem de 3,5% pode contribuir para retardar o processo de envelhecimento no concreto asfáltico e aumentar sua durabilidade. Entretanto o método de dosagem (SUPERPAVE) determina que este valor de volume de vazios ideal deve ser de 4%, um pouco acima do encontrado para a adição de 3,5% de cinza. Nessa ótica a adição de 4,0% de cinza também é benéfica no sentido de aumentar sua durabilidade.

Quanto a relação betume vazios (R.B.V.), que compreende a quantidade de vazios preenchidos por betume, pode-se verificar na Figura 42, que apenas as amostras que continham 4,5% de cinza não foram compreendidas dentro dos limites estabelecidos na norma DNIT ES 31/2006. Resultado que já era esperado, pois as mesmas já haviam indicado um maior número de vazios. O maior número de vazios pode estar relacionado com a quantidade de vazios contidos na própria cinza (AZZAM

*et al.*, 2016), que começam a se fazer significativos quando do incremento de sua adição.

Autores reportam que o incremento de certos fíleres pode requerer maior quantidade de asfalto, em função de sua alta área superficial e capacidade de absorção (LIKITLERSUANG e CHOMPOORAT, 2016).

Figura 42 - Variação dos vazios preenchidos com betume nas misturas com adição com cinza.

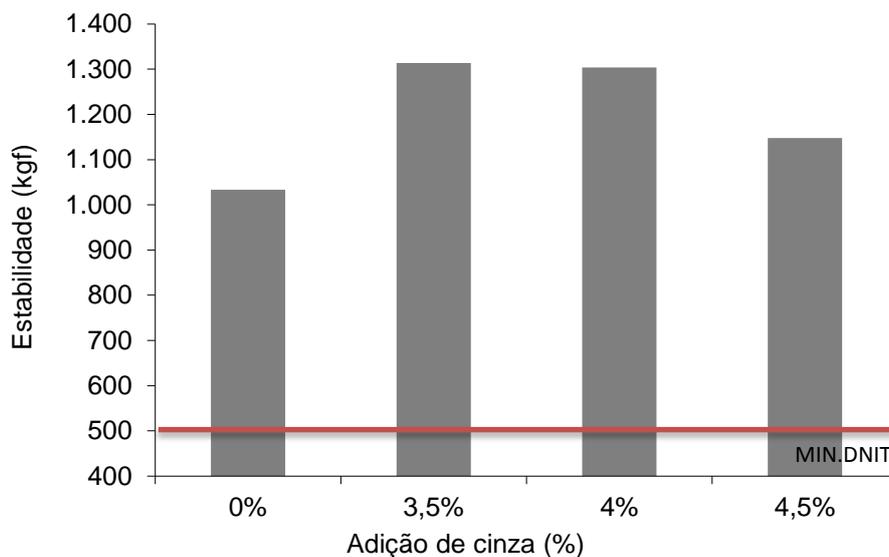


Fonte: O autor (2017).

O gráfico com os resultados de estabilidade Marshall pode ser visto na Figura 43. De acordo com o exposto, verifica-se que todas as misturas com adição de cinza de Algaroba (3,5%, 4,0% e 4,5%) apresentaram maior estabilidade que a misturas de referência. Este fato indica que os corpos de prova com cinza incorporada são mais resistentes à ruptura; entretanto, ressalta-se que todas as amostras obtiveram mais que o dobro da resistêcia mínima solicitada. O maior valor absoluto atingido foi para a mistura com adição de 3,5% de cinzas de Algaroba.

O incremento da estabilidade Marshall foi também observada por outros autores que utilizaram os mais diversos tipos de fíler (AHMED *et al.*, 2006; MODARRES e RAHMANZADEH, 2014).

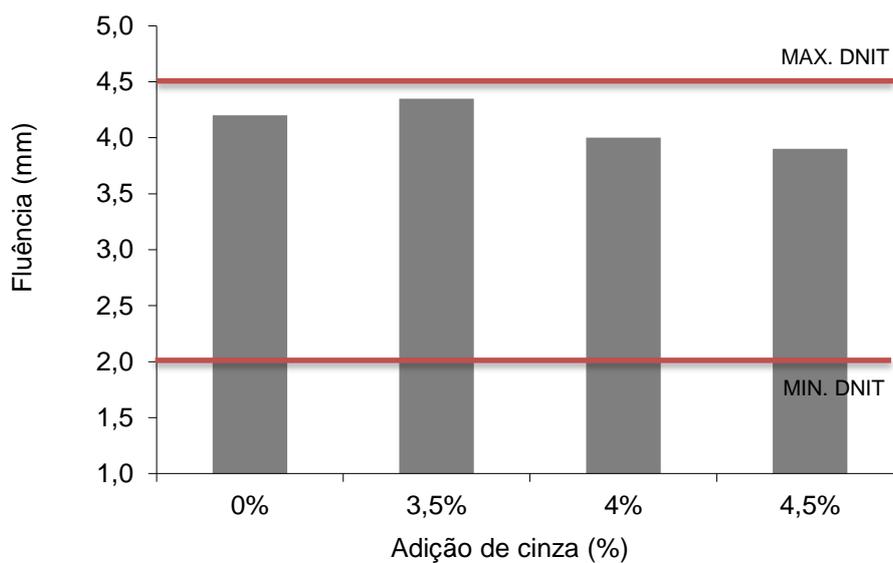
Figura 43: Variação da estabilidade Marshall (kgf) nas misturas com adição com cinza.



Fonte: O autor (2017).

Os corpos de prova com adição de cinza de Algaroba apresentaram valores de fluência muito próximos aos da amostra de referência Figura 44. Ou seja, há um deslocamento vertical semelhante entre as amostras, quando submetidas a carga máxima. Esta medida corresponde a deformação do corpo de prova no momento da ruptura.

Figura 44: Variação da fluência Marshall nas misturas com adição de cinza de Algaroba.



Fonte: O autor (2017).

Assim, os resultados acima indicam que a cinza de Algaroba pode ser usada como fíler de acordo com os requerimentos com base na norma DNIT ES 31/2006 para CBUQ, Faixa “C”.

#### **4.4 Ensaios para propriedades mecânicas**

Os ensaios das propriedades mecânicas foram realizados para as adições de 3,5%, 4,0% e 4,5% de cinza, com teor de 5,5% de ligante. Embora a mistura com 4,5% de cinza e 5,5% de ligante não tenha atendido os parâmetros da R.B.V. os ensaios das propriedades mecânicas foram mantidos a fim de compará-los com as outras adições.

##### **4.4.1 Resistência à tração**

Na Figura 45, são apresentados os resultados de resistência a tração para a mistura de referência (0% de cinza de Algaroba), comparativamente às misturas adicionadas de 3,5%, 4,0% e 4,5% de cinza. Como pode ser visto, todas as amostras analisadas atenderam ao valor mínimo de 0,65 MPa estabelecido pela norma DNIT ES 31/2006.

Ao avaliar as barras de erro com base no desvio-padrão, pode-se dizer que não há mudanças significativas (com base no desvio-padrão de três corpos de prova) na resistência a tração, quando da adição de 3,5%, 4,0% ou 4,5% de cinza de Algaroba, comparada à mistura de referência. Isso significa que a adição de cinza de Algaroba em até 4,5% não influencia consideravelmente na resistência a tração nas misturas asfálticas avaliadas.

Verificou-se, assim, que o uso da cinza de Algaroba nas proporções de 3,5%, 4,0% e 4,5% não apresentou efeitos deletérios na resistência a tração dos CBUQs avaliados, garantindo, a manutenção da capacidade estrutural da mistura de CBUQ após a adição das cinzas em até 4,5%.

A manutenção na resistência a tração, pelo menos, bem como seu incremento, é importante para se inferir que a presença da cinza não irá piorar o desempenho do pavimento sob tensão de tração (SKAF *et al.*, 2016).

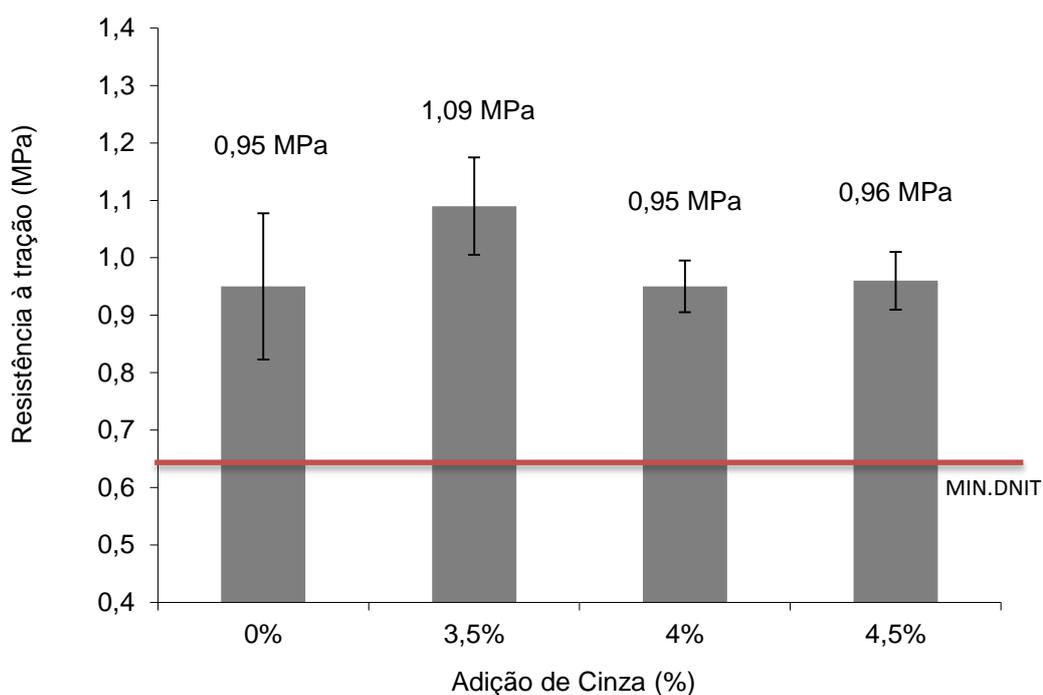
No entanto, ainda se levando em consideração as resistências em suas dispersões em termos de desvio-padrão, os valores de resistência a tração com a

adição de 3,5% de cinzas de Algaroba são maiores que quando da adição de 4,0 ou 4,5%. Nota-se que, o teor de 3,5% de cinza se destaca entre todos, pois além de ter apresentado a maior resistência média a tração, foi a mistura que suportou mais carga antes de romper, levando-se em consideração os valores médios. Esse aumento da resistência a tração com a presença da cinza em 3,5% pode estar atrelado a diminuição do volume de vazios, conforme mostrado na Figura 41.

Outro comportamento observado é que a partir do teor de 4,0% até o de 4,5% de cinza não há variação nos resultados de resistência a tração, o que sugere que este seria um ponto de saturação da mistura, ou seja, a partir desse ponto a quantidade de cinza adicionada não melhoraria as qualidades da mistura asfáltica (Figura 45).

Outros autores também obtiveram resistências a tração similares a esta ordem de grandeza para temperaturas de teste em torno de 25 °C (SUNG DO *et al.*, 2008; ARABANI *et al.*, 2015). Bem como concluem que a presença de materiais que atuem como fíler podem manter ou aumentar a resistência a tração dos concretos asfálticos (AHMED *et al.*, 2006; MODARRES e RAHMANZADEH, 2014; ARABANI *et al.*, 2015; AKBULUT *et al.*, 2012; LIKITLERSUANG e CHOMPOORAT, 2016).

Figura 45: Resistência a tração das misturas com adição com cinza de Algaroba.



Fonte: O autor (2017).

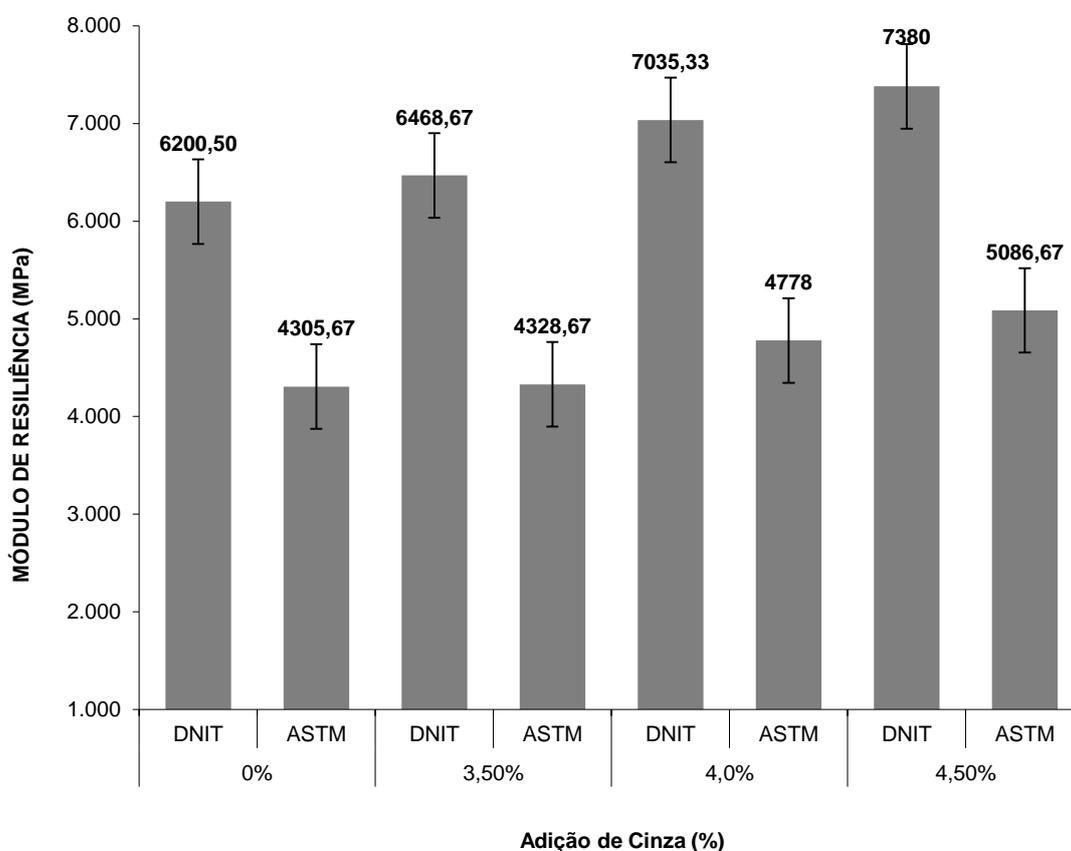
#### 4.4.2 Módulo de resiliência

Os ensaios foram realizados com 10% da força de ruptura a tração, a 25 °C, como é recomendado em norma DNIT ME 135/2010; essa carga também foi adotada para a realização da ASTM D7369 – 11.

Os resultados dos ensaios de módulo de resiliência das misturas estudadas estão apresentados na Figura 46.

O módulo de resiliência é a variável mais importante para o projeto mecânico da estrutura de pavimento flexível. Esta é a medida da resposta do pavimento em formas de estresse dinâmico e tensões correspondentes (RONGALI *et al.*, 2013). A análise dos dados permite determinar a rigidez da mistura, segundo a relação entre a repetição da tensão de desvio e as deformações recuperáveis.

Figura 46: Ensaio de módulo de resiliência.



Fonte: O autor (2017).

Levando-se em consideração as barras de erro com base no desvio-padrão, pode-se notar que de modo geral, não houve efeitos prejudiciais na rigidez dos CBUQs avaliados quando da adição de cinza nas proporções de 3,5% e 4,0%, havendo incremento no módulo de resiliência para a mistura com 4,5% de adição de cinza. Tanto para a norma brasileira quanto para a norma americana, os resultados seguiram a mesma tendência.

Os resultados de módulo de resiliência ratificam os resultados das resistências a compressão para as adições de 3,5% e 4,0% de cinzas. Isso significa que a adição de cinza de Algaroba em até 4,0% não influencia consideravelmente o módulo de resiliência das misturas asfálticas avaliadas.

No caso da adição de 4,5% de cinzas, apesar da maior rigidez, não houve, assim, aumento significativo na resistência a tração, uma vez que essa propriedade é influenciada por outros parâmetros do sistema. Provavelmente, a maior quantidade de cinzas proporcionou um aumentando a rigidez do sistema, pois sua fração mais fina se une ao ligante (LIAO *et al.*, 2013; (MODARRES e RAHMANZADEH, 2014; LIKITLERSUANG e CHOMPOORAT, 2016). Além disso, uma possível influência para o aumento é também o incremento na interação ligante ao agregado e na qualidade de ligação entre o agregado e o ligante (MODARRES e RAHMANZADEH, 2014).

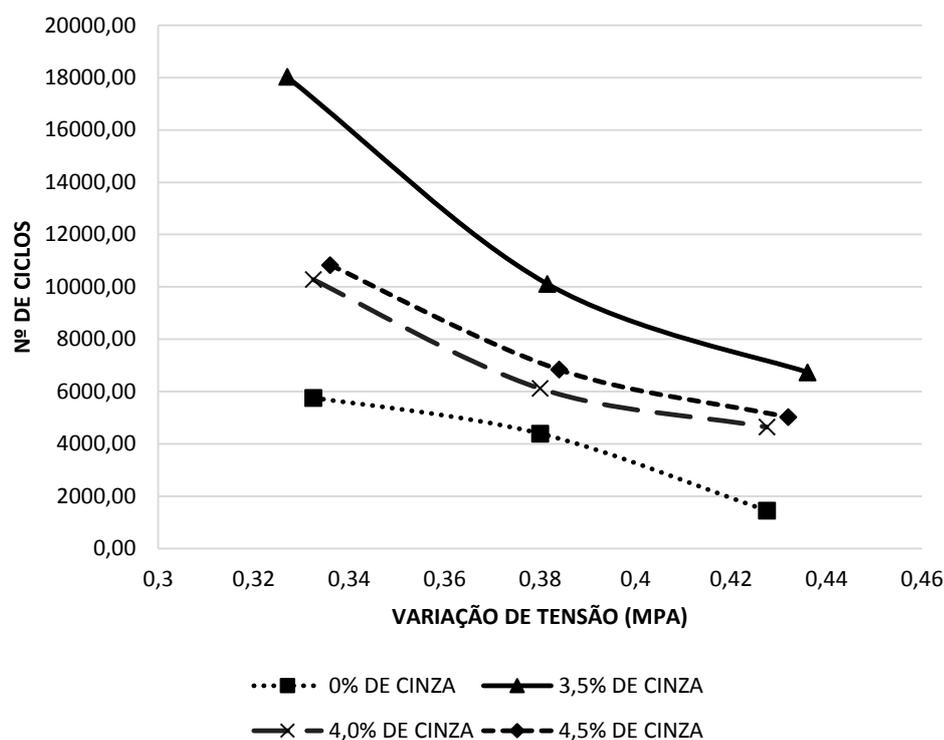
Os valores de módulo de resiliência estão de acordo com o encontrado por outros autores (AZZAM e AL-GHAZAWI, 2015; RONGALI *et al.*, 2013; LIKITLERSUANG e CHOMPOORAT, 2016). Além disso, autores têm relatado tendência ao aumento do módulo de resiliência quando há o uso de fíleres, comparativamente a misturas de referência, e, geralmente, esse incremento é diretamente proporcional a quantidade de fíler no sistema (AZZAM e AL-GHAZAWI, 2015; MODARRES e RAHMANZADEH, 2014; RONGALI *et al.*, 2013; LIKITLERSUANG e CHOMPOORAT, 2016).

#### 4.4.3 Resistência a fadiga

Os resultados do ensaio de fadiga com 45%, 40% e 35% da força da resistência a tração estão representados na Figura 47. Nos ensaios realizados com adição de 3,5%

foram adotadas as forças de 40%, 35% e 30% da resistência a tração em virtude de limitações do equipamento.

Figura 47: Curvas de fadiga.



Fonte: O autor (2017).

O que se pode inferir dos resultados é que as amostras adicionadas de cinza apresentaram um ganho significativo a vida de fadiga da mistura. Se comparados a mistura com 0% de cinza, o número de ciclos até a falha quase que dobra com relação a fadiga quando da adição das cinzas de Algaroba, nas três proporções avaliadas. Por exemplo, a vida de fadiga média de misturas contendo 3,5%, 4,0% e 4,5% de cinza de Algaroba foi de 10.116, 10.279 e 10.838,5 ciclos até a falha, que representam 1,76, 1,78 e 1,88 vezes em 35%RT, respectivamente, comparativamente a mistura de referência.

Os resultados estão de acordo com outros autores que avaliaram a adição de fíleres alternativos, comparativamente a uma amostra de referência, de forma que a presença dos mais diversos tipos de fíleres, em geral, aumentou a resistência a fadiga das misturas. (SUNG DO *et al.*, 2008; CHEN *et al.*, 2011; YILMAZ *et al.*, 2011; XIE et

al., 2012; CHANDRA e CHOUDHARY, 2013; LIAO *et al.*, 2013; NWAIOBAKATA e AGWUNWAMBA, 2014; ARABANI *et al.*, 2015; MODARRES *et al.*, 2015).

Acredita-se que uma das possíveis influências para a melhoria na resistência a fadiga, é que a presença das cinzas de Algaroba possa ter resultado em uma mistura de comportamento, mais no regime elástico que no regime plástico (ARABANI *et al.*, 2015; CHANDRA e CHOUDHARY, 2013).

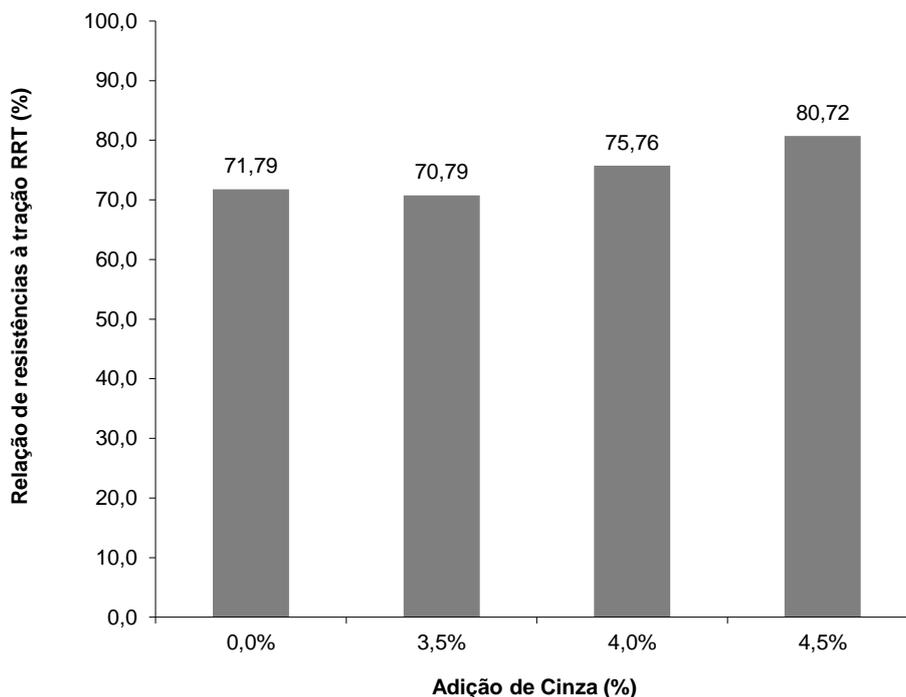
Outro ponto de influência positiva, é o fato das misturas com cinza de Algaroba apresentarem maior adesividade entre o asfalto e o agregado, o que pode ter contribuído para uma melhor resistência a propagação de trincas sob repetição de cargas (XIE *et al.*, 2012). Arabani *et al.* (2015) dizem que há uma reação química entre a mistura asfáltica e a superfície do agregado, fazendo com que se tenha uma adesão química, além de um reforço não só químico, mas físico entre as partículas de fíler e o asfalto, aumentando as propriedades contra a fadiga do mástico físico por intertravamento (LIAO *et al.*, 2013). Likitlersuang e Chompoorat (2016) ratificam esse fenômeno concluindo que há interações entre o fíler e outros materiais constituintes do concreto asfáltico, o que contribui para a performance da mistura.

#### 4.4.4 Resistência ao dano por umidade induzida

Os corpos de prova foram moldados com energia variável de compactação, de modo a se obter volume de vazios igual a 7% para cada teor de cinza adicionado.

Todas as misturas estudadas, tanto a de referência como as adicionadas de cinza, atingiram o valor da relação de resistência a tração especificado como mínimo pela AASHTO 283 (2007) e a norma Brasileira ABNT 15617 (2015), que estipulam 70% do valor da amostra não condicionada (Figura 48).

Figura 48: Relação de resistências a tração RRT (Lottman)



Fonte: O autor (2017).

Normalmente, há relatos que as amostras com adição de cinza, apresentam um bom desempenho como materiais contribuintes da adesividade. Em geral, a presença de fíler aumenta a adesividade do ligante com o agregado (MODARRES *et al.*, 2015; XIE *et al.*, 2012; ARABANI *et al.*, 2015; LIAO *et al.*, 2013; LIKITLERSUANG e CHOMPOORAT, 2016) e, conseqüentemente, são reportadas melhorias nessas propriedades em concretos asfálticos com fíler (MODARRES *et al.*, 2015; SUNG DO *et al.*, 2008; AL-HDABI, 2016; LIKITLERSUANG e CHOMPOORAT, 2016; NASSAR *et al.*, 2016).

Há pesquisadores que relatam que essa melhoria ocorre até um ponto ótimo de adição de fíler, e que depois os resultados são prejudicados (HASSAN, 2005), mas esse ponto de saturação não foi observado aqui para as porcentagens estudadas em termos de resistência ao dano por umidade induzida. Além disso, há estudos que mostram que se o fíler é hidrofóbico, esse potencial de proteção é ainda mais potencializado (CHEN, M. Z. *et al.*, 2011).

Salienta-se que os índices de dano por umidade induzido, foram ainda melhores para as misturas com 3,5% de adição de cinza de Algaroba que os da

amostra de referência, fato que pode ser atribuído aos pontos de contato gerados entre o material fíler e os grãos dos agregados graúdos e miúdos, uma vez que a susceptibilidade a umidade é altamente dependente da adesão betume-agregado (FOROUTAN MIRHOSSEINI *et al.*, 2016).

## 5 CONCLUSÕES

### 5.1 Conclusões

Como conclusão geral, tem-se que a incorporação da cinza de Algaroba no CBUQ, é tecnicamente eficiente para estabilizar a mistura sem perda de desempenho de sua função, para aplicação em camada de revestimento asfáltico. Com isso, obtém-se melhorias nas propriedades mecânicas que, além de proporcionar uma destinação final ao resíduo, também cria a possibilidade de utilizar um subproduto da indústria têxtil, em substituição aos recursos naturais.

A cinza de Algaroba se mostrou eficiente para contribuir com a compacidade do sistema. Os teores de 3,5%, 4,0%, 4,5% de incorporação de cinza de Algaroba atenderam granulometricamente à especificação de serviço DNIT ES 31/2006 para concreto asfáltico em faixa de rolamento faixa “C”.

O teor de ligante ótimo foi de 5,5% para todas as misturas (0%, 3,5%, 4,0% de incorporação cinza de Algaroba). A cinza de Algaroba pode ser usada como fíler de acordo com os requerimentos com base na norma DNIT ES 31/2006 para CBUQ, Faixa “C”. Os valores de fluência, % de vazios e relação de betume-vazios encontrados para os corpos de prova que continham 3,5% e 4,0% de cinza de Algaroba atenderem os limites normativos. A relação de betume vazios com 4,5% de cinza obteve o valor de 72,7%, abaixo da exigência mínima que é 75% para camada de rolamento. Os outros parâmetros das amostras de 4,5% de cinza de Algaroba foram atendidos.

Para o valor de projeto de 5,5% de CAP todas as amostras, inclusive a de referência, obtiveram uma estabilidade maior que 1000 kgf, onde se recomenda uma estabilidade mínima de 500 kgf na norma DNIT ES 31/2006.

Não houve efeitos prejudiciais na resistência a tração, nem na rigidez, nem na resistência a fadiga dos CBUQs avaliados, quando da adição de cinza nas proporções de 3,5%, 4,0% e 4,5%. Houve incremento no módulo de resiliência para a mistura com 4,5% de adição de cinza, bem como todas as amostras atingiram patamares de resistência a tração superiores ao estabelecido em norma. As amostras adicionadas de cinza apresentaram um ganho significativo a vida de fadiga da mistura, praticamente dobrando-a em todas as adições de cinza avaliadas.

A presença da cinza de Algaroba nas proporções estudadas, não foi deletéria em termos de durabilidade ao dano induzido por água. Todas as misturas estudadas, tanto a de referência como as adicionadas de cinza, atingiram o valor da relação de resistência a tração especificado como mínimo pela AASHTO 283 (2007) e a norma Brasileira ABNT 15617 (2015) que estipulam 70% do valor da amostra não condicionada.

## 5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Recomendam-se para trabalhos futuros os itens que seguem:

- realizar estudos de cunho ambiental, como por exemplo lixiviação;
- estudar outras porcentagens de adição entre 3,5% e 4,0%;
- realizar um estudo da cinza com ligantes modificados;
- analisar o uso combinado da cinza com outros fíleres;
- estudar o uso combinado da cinza com outros tipos de agregados;
- estudar o uso da cinza em camadas de micro revestimento;
- realizar um estudo de dosagem pelo método Superpave;
- estudar trecho experimental para que este revestimento possa ser testado e avaliado na prática;
- inserir a cinza, por meio úmido junto com o ligante, bem como estudar diferentes aplicações do uso do ligante modificado por cinza;
- realizar um estudo semelhante para o lodo têxtil, uma vez que este também é um resíduo muito gerado no APL de confecções de agreste pernambucano com grande potencial poluidor;
- estudar quais outros tipos de cinza de biomassa são geradas na região para que possa ser aplicada metodologia semelhante a esta pesquisa.

## REFERÊNCIAS

\_\_\_\_\_. AASHTO – *Americam Association of State Highway and Transportation Officials. Society for Testing Materiais. AASHTO T 283: Resistance of compacted Bituminous Misture to Moisture Induced Damage*, 2007.

\_\_\_\_\_. AASHTO. *Handbook of hot-mix asphalt paving. American Association of State Highway and Transportation Officials*, 1991.

ABIT - Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecções. “**Agreste TEX**” **2016 movimentando mercado têxtil do Nordeste. 19/01/2016 - 11h33**” Disponível em: <<http://www.abit.org.br/Imprensa.aspx#2172|ND|C>>. Acessado em 31 de janeiro de 2016.

ABNT NBR 15617:2015: **Misturas asfálticas - Determinação do dano por umidade induzida**, 2015.

AHMED, H. Y.; OTHMAN, A. M.; MAHMOUD, A. A. *Effect of using waste cement dust as mineral filler on the mechanical properties of hot mix asphalt. Ass. Univ. Bull. Environ. Res.*, v. 9, n. 1, 2006.

AKBULUT, H. et al. *Investigation of using granite sludge as filler in bituminous hot mixtures. Construction and Building Materials*, v. 36, p. 430-436, 11// 2012.

AL-HDABI, A. *Laboratory investigation on the properties of asphalt concrete mixture with Rice Husk Ash as filler. Construction and Building Materials*, v. 126, p. 544-551, 11/15/ 2016.

ALENCAR, A.E., BRINGER, R.M., SOARES, J.B. & DE SOARES, S. **Efeito da presença de aditivos nas propriedades reológicas do Ligante Asfáltico Modificado por EVA**. 18 Encontro de Afalto, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás IBP, Rio de Janeiro, 2006.

ALI, L. & FIAZ A., *Use of Fly Ash Alongwith Blast Furnace Slag as Partial Replacement of Fine Aggregate and Mineral Filler in Asphalt Mix, at High Temperature. GeoHunan International Conference 2009 Material Design, Construction, Maintenance, and Testing of Pavements*, pp. 112 – 118, 2009.

APL DE CONFECÇÕES DO AGRESTE PMC DO APL DE CONFECÇÕES REVITALIZADO - Programa de Produção e Difusão de Inovações para a Competitividade de APLs do Estado de Pernambuco – BID (BR-L1020) Recife, 2009.

AHMED, H. Y.; OTHMAN, A. M.; MAHMOUD, A. A. *Effect of using waste cement dust as a mineral filler on the mechanical properties of hot mix asphalt International Ass. Univ. Bull. Environ. Res.*, v. 9, p. 51-60, 3/01/ 2006.

AL-HDABI, A. *Laboratory investigation on the properties of asphalt concrete mixture with Rice Husk Ash as filler. Construction and Building Materials*, v. 126, p. 544-551, 9/18/ 2016.

ARABANI, M. *Effect of glass cullet on the improvement of the dynamic behaviour of asphalt concrete.* **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 1181–1185, 10/25/ 2010.

ARABANI, M.; BABAMOHAMMADI, S.; AZARHOOSH, A. R. *Experimental investigation of seashells used as filler in hot mix asphalt.* **International Journal of Pavement Engineering**, v. 16, n. 6, p. 502-509, 2015/07/03 2015.

ARABANI, M.; BABAMOHAMMADI S.; AZARHOOSH, A. R. *Experimental investigation of seashells used as filler in hot mix asphalt* **International Journal of Pavement Engineering**, p. 37-41, 7/30/ 2014.

\_\_\_\_\_. **ASTM D-7369-11: Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension Test**, 2011.

AZZAM, M. O. J.; AL-GHAZAWI, Z. *Evaluation of incorporating oil shale filler aggregate into hot mix asphalt using Superpave mix design.* **Construction and Building Materials**, v. 101, Part 1, p. 359-379, 12/30/ 2015.

AZZAM, M. O. J.; AL-GHAZAWI, Z.; AL-OTOOM, A. *Incorporation of Jordanian oil shale in hot mix asphalt.* **Journal of Cleaner Production**, v. 112, Part 4, p. 2259-2277, 1/20/ 2016.

BARBOSA, A.,A., S., **Desenvolvimento de argamassas de revestimento com adição concomitante de cinzas de lenha e lodo têxtil gerados no apl confecções Pernambucano.** 2012 Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco. Caruaru – PE.

BARDINI, V.S. **Influência do Fíller Mineral em Propriedades de Misturas Asfálticas Densas.** Tese de doutorado, USP, São Carlos, SP, 344p., 2013.

BARDINI, V.S., KLINSKY, L.M. & FERNANDES, J.L. **A importância do filer para o bom desempenho de misturas asfálticas.** *Minerva*, 7(1): 71-78, 2010.

**BEN - BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2016 - ano base 2015 - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME.** Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br>>. Acessado em 02 de novembro de 2016.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica básica para engenheiros.** PETROBRASABEDA. Rio de Janeiro, 2008,

BERNUCCI, L. B.; LEITE, L. M.; MOURA, E. **Propriedades mecânicas em laboratório de misturas asfálticas convencionais e modificadas por polímeros.** 16<sup>o</sup> Encontro do Asfalto, 2002, Rio de Janeiro. Anais do 16<sup>o</sup> Encontro do Asfalto. Rio de Janeiro: Horta Barbosa, 2002. p. 1-9.

BOCK, A.L., HARTMAN, D., BUDNY, J., SPECHT, L.P. & CERATTI, J.A. **Estudo laboratorial sobre os efeitos de diferentes formas de adição de cal a concreto asfáltico.** *Teoria e Prática na Engenharia Civil*, nº14 59-69. 2009.

BONETI, I. I. **Valorização do resíduo areia de fundição (raf). Incorporação nas massas asfálticas do tipo C.B.U.Q.** 2002. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Santa Catarina. - Florianópolis – SC.

BORLINI, M. C. ; SALES, H. F. ; VIEIRA, C. M. F. ; CONTE, R. A. ; PINATTI, D. G ; MONTEIRO, S. N.: **“Cinza da lenha para aplicação em cerâmica vermelha”** Cerâmica v. 51 pp. 192-196, 2005.

CARDOSO, M. F. M. **Viabilidade do uso de cinzas de coco babaçú (*orbignya speciosa*) em argamassas.** 2014. 75p. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM), UFPE, Caruaru - PE.

CAVALCANTI FILHO, L. L. **Avaliação da resistência a compressão simples e absorção de água de tijolos vazados de solo-cimento produzidos a partir da substituição parcial do cimento pela cinza da lenha de Algaroba.** 2016. 95p. Dissertação(mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM), UFPE, Caruaru - PE

ÇELIK, Ö. *Influence of Fly Ash on the Properties of Asphalt.* ***Petroleum Science and Technology***, v. 25, n. 13, p. 1571-1582, 8/22/ 2008.

CHAN, J. S. ;ALI, N.; SIMMS, S.; BUSHMAN, R; BERGAN, A. T., *Mechanistic evaluation of fly ash asphalt concrete mixtures.* ***Journal of materials in civil engineering*** pp. 19- 25 / fevereiro, 1996.

CHANDRA, S.; CHOUDHARY, R. *Performance Characteristics of Bituminous Concrete with Industrial Wastes as Filler.* ***Journal of Materials in Civil Engineering***, v. 25, n. 11, 2013.

CHEN, M.; LIN, J.; WU, S. *Potential of recycled fine aggregates powder as filler in asphalt mixture.* ***Construction and Building Materials***, v. 25, n. 10, p. 3909-3914, 10// 2011.

CHEN, M.-Z. et al. *Utilization of recycled brick powder as alternative filler in asphalt mixture.* ***Construction and Building Materials***, v. 25, n. 4, p. 1532-1536, 4// 2011.

CHURCHILL, E. V. & AMIRKHANIAN, S. N., *Coal ash utilization in asphalt concrete mixtures,* ***Journal Of Materials In Civil Engineering***, pp. 295-301 / novembro, 1999.

\_\_\_\_\_.DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.**DNIT-ME 035/98:**Determinação da Abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_.DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.**DNIT-ME 043/95:** Ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_.DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.**DNIT-ME 054/97:** Equivalente de areia. Rio de Janeiro, 1997.

\_\_\_\_\_.DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.**DNIT-ME 078/94:** Agregado graúdo - adesividade a ligante betuminoso. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_.DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.**DNIT-ME 079/94**: Adesividade a ligante betuminoso. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_.DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.**DNIT-ME 081/98**:Determinação da absorção e da densidade do agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_.DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.**DNIT-ME 083/98**:Agregados – Índice de Forma de Agregado. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_.DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.**DNIT-ME 084/95**:Agregado Miúdo – Determinação da Densidade Real.Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_.DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.**DNIT-ME 085/94**: Massa específica real (material finamente pulverizado). Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_.DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.**DNIT-ME 086/94**: Material de enchimento para misturas betuminosas. Rio de Janeiro, 1994

\_\_\_\_\_.DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.**DNIT-ME 367/97**: Material de enchimento para misturas betuminosas. Rio de Janeiro, 1997.

\_\_\_\_\_.DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.**DNIT-ES 031/2006**: Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico especificação de Serviço,. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_.DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.**DNIT-ES 095/2006**: Cimentos asfálticos de petróleo -Especificação de material. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_.DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.**DNIT-ES 135/2010**: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação do módulo de resiliência –Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_.DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.**DNIT-ES 136/2010**: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação da resistência a tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_.DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.**Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro, 2006.

DRUMOND, M. A.; PIRES, I. E.; BRITO, J. O. **Algarobeira: uma alternativa para preservar as espécies nativas do nordeste semi-árido**. Silvicultura, São Paulo, v. 10, n. 37, p. 51-53, 1984. Edição dos Anais do 1º Seminário sobre Potencialidade Florestal do Semi-árido Brasileiro, 1984, João Pessoa.

EILER, L. M. **Reologia de ligantes asfálticos mediante el viscosímetro brookfield**. Monografia. 118-131. Artículo técnico Lemac, Buenos aires, Argentina, 2009.

FELLENBEG, G. **Introdução aos problemas da poluição ambiental**. Trad. de J. H. Maar e C. G. Froehlich. São Paulo: Ed. da Universidade de São Paulo, 1980.

FOROUTAN MIRHOSSEINI, S. A. et al. *Applying surface free energy method for evaluation of moisture damage in asphalt mixtures containing date seed ash*. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 408-416, 10/30/ 2016.

HASSAN, H. F. *Recycling of municipal solid waste incinerator ash in hot-mix asphalt concrete*. **Construction and Building Materials**, v. 19, n. 2, p. 91-98, 3// 2005.

HUANG, Y.; BIRD, R. N.; HEIDRICH, O. *A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements*. **Conservation and Recycling**, v. 52, p. 58–73, 4/6/ 2007

HUWAE, D.D.M., PARERA, L.R.; TANIJAYA, J. **Bagasse-Ash as Filler in HRS (Hot Rolled Sheet) Mixture**. *Anais do The World Congress on Advances in Civil, Environmental, and Materials Research, Jeju Island - Korea, 28 de agosto à 01 de setembro.*, 2016.

ITEP - Instituto de Tecnologia de Pernambuco. **“Programa de Produção e Difusão de Inovações para a Competitividade de APLs do Estado de Pernambuco – BID (BR-L1020)”**, 2009 Disponível em: <[http://www.itep.br/images/relatrio\\_pmc\\_confeces\\_revitalizado.pdf](http://www.itep.br/images/relatrio_pmc_confeces_revitalizado.pdf)>. Acessado em 31 de janeiro de 2016.

JCONLINE–Jornal do Comércio Online **“Polo de Confecções do Agreste: da Sulanca a industrialização”** Disponível em: <<http://jconline.ne10.uol.com.br/canal/economia/pernambuco/noticia/2014/12/14/polo-de-confecções-do-agreste-da-sulanca-a-industrializacao-160371.php>>. Acessado em 31 de janeiro de 2016.

JONY, H. H.; AL-RUBAIE, M.; JAHAD, I. *The Effect of Using Glass Powder Filler on Hot Asphalt Concrete Mixtures Properties*. **Eng. & Tech. Journal**, v. 29, n. 1, p. 44-57, 2011.

JUNIOR, T. D. C. **Estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas convencionais modificadas**. 2008. 130 p. Dissertação (mestrado), UFRGS, Porto Alegre - RS.

KHEDAYWI, T. S. *Study on utilising waste toner in asphalt cement*. **Road Materials and Pavement Design**, v. 15, n. 2, p. 446-454, 1/15/ 2014.

KARASAHIN, M.; TERZI, S. *Evaluation of marble waste dust in the mixture of asphaltic concrete*. **Construction and Building Materials**, v. 21, p. 616–620, 2007.

LELOUP, W. D. A. **Efeitos da adição de lodo têxtil e cinzas de lenha gerados no APL de confecções pernambucano em argamassas de cimento Portland**. 2013.

110p. Dissertação(mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM),UFPE, Caruaru - PE.

LIAO, M.-C.; AIREY, G.; CHEN, J.-S. *Mechanical Properties of Filler-Asphalt Mastics. International Journal of Pavement Research and Technology*, v. 6, n. 5, p. 576-581, 2013.

LIKITLERSUANG, S.; CHOMPOORAT, T. *Laboratory investigation of the performances of cement and fly ash modified asphalt concrete mixtures. International Journal of Pavement Research and Technology*, v. 9, n. 5, p. 337-344, 9// 2016.

LIMA, P. C. F. **Comportamento silvicultural de espécies de Prosopis, em Petrolina-PE, região semi-árida brasileira.**1994 111p Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR.

LOUREIRO, T. G. **Estudo da Evolução do Dano por Fadiga em Misturas Asfálticas.** 2003. 98p. Dissertação(mestrado). Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza – CE.

LUCENA, L.C. **Estudo da aplicação da mistura solo-lodo em base e sub-base de pavimentos.**263. p 2012. Tese de doutorado, UFPE, Recife, PE

LHWAIN, A. A. A.; SETYAWAN, A.; ASTUTI, W. *Design and properties of split mastic asphalt modify with bagasse ash. Jurnal Teknik Sipil*, v. 3, nº: 01, 2015.

MARQUES, G. L. O. **Utilização do módulo de resiliência como critério de dosagem de mistura asfáltica; efeito da compactação por impacto e giratória.** Tese de doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 461p., 2004.

MARTINEZ, B. G. J.; CARVALHO, C. J.; LUCENA, L. C. **“Avaliação de desempenho de misturas betuminosas com adição de lodos De ETA e de ETE.”**2014./ Dissertação de mestrado em geotecnia publicação: g. DM – 243/2014 Brasília / DF.

MELO, M.S.C. **Estudo de argamassas adicionadas de cinzas de Algaroba geradas no arranjo produtivo local de confecções do agreste pernambucano.**2012. 120p Dissertação(mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM),UFPE, Caruaru - PE.

MELOTTI, R.; SANTAGATA, E.; BASSANIA, M.; SALVO, M.; RIZZO, S. *A preliminary investigation into the physical and chemical properties of biomass ashes used as aggregate fillers for bituminous mixtures. Waste Management*, v. 33, p. 1906–1917, 06/19/ 2013

MISTRY, R.; ROY, T. K. *Effect of using fly ash as alternative filler in hot mix asphalt. Recent Trends in Engineering and Material Sciences*, v. 8, p. 307-309, 4/27/ 2016

MODARRES, A.; RAHMANZADEH, M. *Application of coal waste powder as filler in hot mix asphalt. Construction and Building Materials*, v. 66, p. 476-483, 9/15/ 2014

MODARRES, A.; RAHMANZADEH, M.; AYAR, P. *Effect of coal waste powder in hot mix asphalt compared to conventional fillers: mix mechanical properties and environmental impacts. Journal of Cleaner Production*, v. 91, p. 262-268, 3/15/ 2015.

MOTA, M. H. A. **Concreto seco com incorporação de cinzas de madeira de Algaroba (*prosopis juliflora*) moldado sob pressão.** 2014. 122p. Dissertação(mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM),UFPE, Caruaru - PE.

MOTTA, L.M.G., LEITE, L.F.M. **Efeito do Filler nas Características Mecânicas das Misturas Asfálticas.** Anais do 11º congresso Panamericano de Engenharia de Trânsito e Transporte, pp. 1007-1017, Gramado-RS, 19-23 Novembro., 2000.

MOURA, L. S., NÓBREGA, A. C., OLIVEIRA, S. M. **Incorporação de cinzas de Algaroba geradas no apl de confecções do agreste pernambucano em concreto betuminoso usinado a quente – CBUQ;** 44ª RAPv – Reunião Anual De Pavimentação E 18º Enacor – Encontro Nacional De Conservação Rodoviária ISSN 1807-5568 RAPv, Foz do Iguaçu-PR, 18 a 21 de Agosto, 2015.

NASCIMENTO, J. E. M. F. **Avaliação dos efeitos da substituição da cal hidratada por Cinzas de algaroba em argamassas de revestimento.** 2014. 99p. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM),UFPE, Caruaru - PE.

NASSAR, A. I. et al. *Mechanical, durability and microstructure properties of Cold Asphalt Emulsion Mixtures with different types of filler. Construction and Building Materials*, v. 114, p. 352-363, 7/1/ 2016.

NWAObakata, C.; AGWUNWamba, J. C. *Influence of Periwinkle Shells Ash as Filler in Hot Mix Asphalt. International Journal of Science and Research (IJSR)*, v. 3, n. 7, p. 2369-2373, 2014.

PEREIRA, J. C. D.; LIMA, P. C. F., **Comparação da qualidade da madeira de seis espécies de algarobeira para a produção de energia.** Colombo: Embrapa Florestas P.99-107, 2002.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. S. **Módulos Resilientes de Concretos Asfálticos.** IPR, Rio de Janeiro-RJ, 1980, 51p.

PIRES, D. R. **Desenvolvimento de argamassas com substituição parcial do cimento Portland por cinzas de Algaroba geradas do APL (Arranjo Produtivo Local) de confecções pernambucano.** 2016. 96p. Dissertação(mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM),UFPE, Caruaru - PE.

RIBASKI, J.; DRUMOND, M. A.; OLIVEIRA, V. R.; NASCIMENTO, C. E. S. *Algaroba(Prosopis juliflora): árvore de uso múltiplo para a Região Semiárida Brasileira. Comunicado Técnico 240, Embrapa Florestas, Colombo - PR, p. 8, 10// 2009.*

ROBERT, F. L.; KANDHAL, P. S.; BROWN, E. R. **Hot mix asphalt materials, mixture design and construction. 2. ed.** Maryland: NAPA Educational Foundation Ingham, 1996.

RONGALI, U. et al. *Laboratory Investigation on Use of Fly Ash Plastic Waste Composite in Bituminous Concrete Mixtures.* **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 104, p. 89-98, 12/2/ 2013

SALEM, Z. T. A.; KHEDAWI, T. S.; BAKER, M. B.; ABENDEH, R. *Effect of Waste Glass on Properties of Asphalt Concrete Mixtures.* **Jordan Journal of Civil Engineering**, v. 11, nº 1, p. 117-131, 2017.

SANTANA, H. **Considerações sobre os nebulosos conceitos e definições de Filler em misturas asfálticas.** REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 29., 1995, Cuiabá. Anais. Cuiabá: Associação Brasileira de Pavimentação, 1995.

SANTOS, K. P. **Estudo da incorporação de argilas montmorilonitas como modificador em cimentos asfálticos de petróleo.** 2012. 105p. Dissertação(mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, UFCG, Campina Grande - PB.

SARGIN, S.; SALTAN, M.; MOROVA, N.; SERIN, S.; TERZI, S. *Evaluation of rice husk ash as filler in hot mix asphalt concrete.* **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 390–397, 8/3/ 2013.

SEBRAE, **Estudo econômico do arranjo produtivo local de confecções do agreste pernambucano**, 2012 Relatório final Serviço de Apoio às Micro e Pequenas Empresas do Estado de Pernambuco Sebrae / Pernambuco - Recife, Maio de 2013.

SEBRAE. **Perfil econômico e principais oportunidades de negócio em Pernambuco**, 2008.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação.** Volume II, Editora PINI Ltda, São Paulo-SP, 2001. 671p.

SKAF, M. et al. *Ladle furnace slag in asphalt mixes.* **Construction and Building Materials**, v. 122, p. 488-495, 9/30/ 2016.

SOBOLEV, K.; VIVIAN, I. S.; SAHA, R.; WASIUDDIN, N. M.; SALTIBUS, N.E., *The effect of fly ash on the rheological properties of bituminous materials*, **Journal Fuel**. 116 pp. 471–477, 2014.

SOLIZ, V. V. P., **Estudo de Três Solos Estabilizados com Emulsão Asfáltica.** 2007. 166p. Dissertação(mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE., Rio de Janeiro – RJ.

SPECHT, L. P.; PALUDO, I.; CERATTI, J. A. P. **Utilização de borracha reciclada como agregado de concreto asfáltico: avaliação laboratorial.** 16<sup>o</sup> Encontro do Asfalto, 2002, Rio de Janeiro. Anais do 16<sup>o</sup> Encontro do Asfalto. Rio de Janeiro: Horta Barbosa, 2002. p. 1-8.

SUNG DO, H.; HEE MUN, P.; SUK KEUN, R. *A study on engineering characteristics of asphalt concrete using filler with recycled waste lime.* **Waste Management**, v. 28, n. 1, p. 191-199, // 2008.

VASUDEVAN, G., *Performance on coal bottom ash in hot mix asphalt*, **IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology**. Volume: 02 Issue: 08 pp. 25 – 33, 2013.

XIE, J. et al. *Influence of surface treated fly ash with coupling agent on asphalt mixture moisture damage.* **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 340-346, 5// 2012.

XUE, Y.; WU, S.; CAI, J.; ZHOU, M.; ZHA, J.: *Effects of two biomass ashes on asphalt binder: "Dynamic shear rheological characteristic analysis.* **Construction and Building Materials**.56:7-15. 2014.

YILMAZ, M.; KÖK, B. V.; KULOĞLU, N. *Effects of using asphaltite as filler on mechanical properties of hot mix asphalt.* **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 11, p. 4279-4286, 11// 2011.

ZAINUDIN, M. Z. M.; KHAIRUDDIN, F. H.; CHOY, P. N.; KHADIJAH, S. C. O.; MISNON, N; MURNIATI, S. *Effect of Sugarcane Bagasse Ash as Filler in Hot Mix Asphalt.* **Materials Science Forum**, v. 846, p. 683-689, 04/03/ 2016.