



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



**ANÁLISE ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM  
CINZA DE TERMELÉTRICA, BIOCHAR E BIOÓLEO**

**IGOR NONATO ALMEIDA PEREIRA**

**MANAUS-AM**

**2020**



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



**IGOR NONATO ALMEIDA PEREIRA**

**ANÁLISE ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM  
CINZA DE TERMELÉTRICA, BIOCHAR E BIOÓLEO**

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

**MANAUS-AM  
2020**

### **Ficha Catalográfica**

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

P436a Pereira, Igor Nonato Almeida  
Análise Econômica da Produção de Misturas Asfálticas  
com Cinza de Termelétrica, Biochar e Bioóleo / Igor  
Nonato Almeida Pereira . 2020  
87 f.: il. color; 31 cm.

Orientadora: Consuelo Alves da Frota  
Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de  
Materiais) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Misturas Asfálticas. 2. Viabilidade Econômica. 3. Cinza  
de Termelétrica. 4. Biochar. 5. Bióleo. I. Frota, Consuelo  
Alves da. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

**IGOR NONATO ALMEIDA PEREIRA**

**ANÁLISE ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM  
CINZA DE TERMELÉTRICA, BIOCHAR E BIOÓLEO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.  
Linha de pesquisa: Pavimentação.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Consuelo Alves da Frota

**BANCA EXAMINADORA**



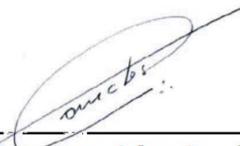
---

**Prof. Dra. Consuelo Alves da Frota (Orientadora e Presidente)**  
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM-UFAM)



---

**Prof. Dr. Leandro Aparecido Pocrifka**  
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM-UFAM)



---

**Prof. Dr. Antônio Estanislau Sanches (UEA)**  
Universidade do Estado do Amazonas (UEA)

À Deus, nosso criador e pai de infinita bondade.  
À minha família, em especial aos meus pais,  
Nonato e Maurean, pelo apoio em todos os  
momentos, pelo incentivo e confiança que  
sempre depositaram em mim, com infindável  
amor.

## AGRADECIMENTOS

À Deus, em primeiro lugar, por me conceder sabedoria e força durante todos os meses do processo de pós-graduação.

Agradeço a minha família que sempre acreditou em mim no decorrer de minha vida acadêmica. Aos meus pais, Raimundo Nonato dos Santos Pereira e Maurean Sávvia de Almeida Marques, pelo amor incondicional, carinho e incentivo aos estudos.

À minha orientadora, Prof<sup>a</sup>. Dra. Consuelo Alves da Frota, por acreditar em mim, por me orientar com tanta dedicação e presteza, pela paciência e compreensão em todos os momentos, inspirando-me a ser um ser humano melhor e a continuar na jornada da docência e pesquisa.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Newton Paulo de Souza Falcão, que me orientou quanto ao processo de pirólise.

À Valéria Oliveira, minha namorada, que sempre me incentivou e torceu por minhas vitórias, externo o meu amor e minha gratidão.

À Ardo Construtora e Pavimentação LTDA e à BK Energia Itacoatiara LTDA, pela doação dos materiais utilizados nesta pesquisa.

À Universidade Federal do Amazonas e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais pela oportunidade.

Ao GEOTEC pela estrutura, apoio e por me abraçar como pesquisador.

A todos os meus amigos que contribuíram direta ou indiretamente e acreditaram em mim e no êxito deste trabalho.

Eu agradeço de coração. Muito obrigado!

“Quando tudo parecer dar errado em sua vida, lembre-se que o avião decola contra o vento, e não a favor dele”.

(Henry Ford).

## RESUMO

A substituição dos materiais convencionais utilizados em misturas asfálticas a quente, por outros de boa técnica, menor custo e impacto ambiental, tem motivado nas últimas décadas pesquisas nessa área do conhecimento. Nesse contexto, destacam-se as cinzas provenientes da geração de energia em usinas termelétricas e resíduos industriais, exemplo as Placas de Circuito Impresso (PCI), que ao serem submetidas a decomposição térmica, no processo de pirólise com ausência de oxigênio, produzem o biochar e o bio-óleo. No trabalho em questão comparou-se o custo da produção do concreto asfáltico tradicional (referência) relativo a composições asfálticas contendo os citados materiais alternativos. Examinou-se também a implantação de uma planta de pirólise em três cenários. No primeiro caso, considerou-se a produção de 100 t/mês de bio-óleo para atender a total demanda de uma usina de asfalto. Em segundo contexto, verificou-se para uma capacidade de 500 t/mês, a segmentação de 20% destinados ao consumo interno da empresa fabricante da mistura asfáltica e 80% disponíveis para comercialização. Na terceira possibilidade averiguou-se a produção total de 500 t/mês para venda. Tais investigações baseou-se no cálculo do Valor Presente Líquido (VPL), da Taxa Interna de Retorno (TIR) e do Período de Recuperação do Capital Simples (Payback). Os resultados mostraram que, a maior economia ocorreu quando se substituiu parcialmente, em torno de 10%, o CAP tradicional pelo bio-óleo. Ressalta-se ainda que, o primeiro cenário apresentou os menores riscos de investimento, tendo registrado a TIR igual a 143% e o Payback da ordem de 182 dias, enquanto constatou-se o segundo cenário como o de maior rentabilidade, com valor em torno de R\$ 24,6 milhões. Portanto, conclui-se ter viabilidade econômica a utilização de cinza de termelétrica, bio-óleo e biochar em misturas asfálticas.

**Palavras-chave:** Misturas asfálticas. Cinza de Termelétrica. Biochar. Bio-óleo. Viabilidade Econômica. Pirólise.

## **ABSTRACT**

The conditions of the highways in Amazonas are worrying, considering that it is the only state in Brazil where there are no roads classified as excellent or good. In this context, research aimed at replacing the materials conventionally used in hot asphalt mixtures with others of good technique, lower cost and environmental impact are pertinent. It is noteworthy that in thermoelectric plants, ashes (light and heavy) are generated that are harmful to the environment and health. In addition, due to the Industrial District, the city of Manaus is a major producer of industrial waste, notably Printed Circuit Boards (PCI), which can undergo pyrolysis and transform into biochar and bio-oil. In this work, an economic analysis of the production of hot machined asphalt mixtures was carried out, with the participation of thermoelectric ash, bio-oil or biochar. In this analysis, the cost of producing traditional asphalt concrete was compared with that containing alternative materials. Also, the implementation of the pyrolysis plant was considered in three scenarios with which the Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR) and Simple Capital Recovery Period (Payback) were calculated. The greatest savings occur when there is a partial replacement (10%) of the traditional CAP by bio-oil. It is noteworthy that the first scenario presented the lowest investment risks with an IRR of 143% and Payback of the order of 182 days, with the second scenario having the highest profitability of around R\$ 24,6 million. It is concluded that the use of thermoelectric ash, bio-oil and biochar in asphalt mixtures is economically viable.

**Keywords: Asphalt Mixtures, Thermoelectric Ash, Biochar, Bio-oil, Economic Viability.**

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1 – Trecho em más condições de tráfego na BR-319</b>	<b>18</b>
<b>Figura 2.1 – Granulometrias pelo DNIT: a) Faixa A; b) Faixa B; c) Faixa C</b>	<b>21</b>
<b>Figura 2.2 – a) Partículas esféricas que compõe as cinzas volantes; b) “cenoesferas”; c) e d) “pleroesferas”</b>	<b>28</b>
<b>Figura 2.3 – Esquema de geração de energia elétrica e produção de cinzas leves e pesadas.</b>	<b>32</b>
<b>Figura 2.4– Módulo de Resiliência (MR) de mistura asfáltica contendo cinza pesada como fíler</b>	<b>33</b>
<b>Figura 2.5 - Biochar, fibra de carbono e negro de fumo</b>	<b>36</b>
<b>Figura 2.6 - Microscopia do biochar, fibra de carbono e do negro de fumo</b>	<b>36</b>
<b>Figura 2.7 – Placa de Circuito Integrado com componentes eletrônicos</b>	<b>37</b>
<b>Figura 2.8 – Placa de Circuito Integrado sem componentes eletrônicos</b>	<b>37</b>
<b>Figura 2.9 – Esquema da classificação das Placas de Circuito Impresso</b>	<b>38</b>
<b>Figura 3.1- Fluxograma contendo a metodologia da pesquisa</b>	<b>43</b>
<b>Figura 3.2 - Corpos de prova cilíndricos conforme norma DNER-ME-043/2005</b>	<b>45</b>
<b>Figura 3.3 – Planta de pirólise rápida com reator de leito fluidizado</b>	<b>47</b>
<b>Figura 4.1 - Corpos de prova da composição asfáltica referência</b>	<b>53</b>
<b>Figura 4.2 – Quantidade de materiais considerando a dosagem referência</b>	<b>63</b>

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 2.1 – Crescimento da geração de resíduos sólidos entre os anos de 2011 e 2013 no Polo Industrial de Manaus</b>	<b>41</b>
<b>Gráfico 4.1 – Volume de vazios x porcentagem de substituição do pó de pedra pela cinza de termelétrica.</b>	<b>55</b>
<b>Gráfico 4.2 – Determinação da porcentagem máxima de substituição do pó de pedra pela cinza de termelétrica.</b>	<b>56</b>
<b>Gráfico 4.3 – Comparativo entre os valores da mistura asfáltica tradicional e as alternativas.</b>	<b>72</b>
<b>Gráfico 4.4 – Comparativo entre a diferença no valor da formulação referência e as alternativas.</b>	<b>73</b>
<b>Gráfico 4.5 – Comparativo entre o Valor Presente Líquido (VLP) dos três cenários.</b>	<b>79</b>
<b>Gráfico 4.6 – Comparativo entre a Taxa Interna de Retorno (TIR) dos três cenários.</b>	<b>79</b>
<b>Gráfico 4.7 – Comparativo entre o Payback dos três cenários.</b>	<b>80</b>

## **LISTA DE QUADROS**

**Quadro 2.1 – Substâncias perigosas, exposição, uso e efeitos a saúde**

**39**

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1 – Composição química das cinzas volantes encontradas na literatura</b>	<b>29</b>
<b>Tabela 2.2 – Análises granulométricas realizadas em cinzas pesadas obtidas de diferentes origens</b>	<b>30</b>
<b>Tabela 2.3 – Propriedades físicas das cinzas pesadas provenientes de termelétricas</b>	<b>30</b>
<b>Tabela 2.4 – Composição química das cinzas pesadas encontradas na literatura</b>	<b>31</b>
<b>Tabela 3.1 - Dosagem utilizada na pesquisa</b>	<b>44</b>
<b>Tabela 3.2 - Porcentagem de cada componente que foi utilizada na mistura asfáltica de referência obtida em laboratório</b>	<b>44</b>
<b>Tabela 3.3 - Especificação DNIT para misturas asfálticas</b>	<b>45</b>
<b>Tabela 3.4 – Composição base para a obtenção do valor da tonelada do CA</b>	<b>49</b>
<b>Tabela 4.1 – Dosagem da mistura referência</b>	<b>51</b>
<b>Tabela 4.2 - Dosagem das misturas asfálticas com biochar</b>	<b>51</b>
<b>Tabela 4.3 - Dosagem das misturas asfálticas com bio-óleo</b>	<b>52</b>
<b>Tabela 4.4 - Massa específica máxima medida e Massa específica aparente da mistura compactada– composição referência.</b>	<b>53</b>
<b>Tabela 4.5 - Parâmetros Volumétricos da mistura referência.</b>	<b>53</b>
<b>Tabela 4.6 - Massa específica máxima medida (Gmm) e massa específica aparente da mistura compactada (Gmb) – composição com a cinza de termelétrica.</b>	<b>54</b>
<b>Tabela 4.7 - Parâmetros Volumétricos da mistura contendo cinza de termelétrica.</b>	<b>55</b>
<b>Tabela 4.8 - Massa específica máxima medida (Gmm) e aparente da mistura compactada (Gmb), composição com 5,15% de substituição do pó de pedra pela cinza de termelétrica.</b>	<b>56</b>
<b>Tabela 4.9 - Parâmetros Volumétricos da mistura asfáltica para 5,15% de substituição do pó de pedra pela cinza de termelétrica.</b>	<b>57</b>
<b>Tabela 4.10 – Valor unitário, segundo o SINAPI para o Amazonas, em junho de 2020.</b>	<b>57</b>
<b>Tabela 4.11 – Custo da mão-de-obra para a operação da planta de pirólise com capacidade para 47 toneladas por dia</b>	<b>60</b>
<b>Tabela 4.12 – Encargos sociais incidentes sobre o valor da mão-de-obra.</b>	<b>60</b>

<b>Tabela 4.13 - Composição do Custo Unitário (CCU) de referência.</b>	<b>62</b>
<b>Tabela 4.14 – Composição do Custo Unitário (CCU) adaptada aos materiais referência e respectivos coeficientes</b>	<b>64</b>
<b>Tabela 4.15 – Distância média dos locais de aquisição dos materiais a região central de Manaus/AM.</b>	<b>64</b>
<b>Tabela 4.16 - Composição do Custo Unitário (CCU) para o transporte dos insumos até o local de produção da mistura asfáltica.</b>	<b>66</b>
<b>Tabela 4.17 – Composição do Custo Unitário (CCU) considerando o insumo alternativo cinza de termelétrica.</b>	<b>68</b>
<b>Tabela 4.18 – Composição de Custo Unitário (CCU) considerando o insumo alternativo Bio-óleo</b>	<b>69</b>
<b>Tabela 4.19 – Composição do Custo Unitário (CCU) par o Bio-óleo e Biochar</b>	<b>71</b>
<b>Tabela 4.20 – Fluxo de caixa com os indicadores TIR, Payback e VLP para 100% de uso interno da produção.</b>	<b>74</b>
<b>Tabela 4.21 – Fluxo de caixa com os indicadores TIR, Payback e VLP, considerando a venda de 80% e o consumo interno de 20% da produção.</b>	<b>76</b>
<b>Tabela 4.22 – Fluxo de caixa com os indicadores TIR, Payback e VLP considerando a venda de 100% da produção.</b>	<b>77</b>
<b>Tabela 4.23 – Comparativo entre os indicadores de viabilidade econômica dos três cenários</b>	<b>78</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
AAUQ	Areia asfalto usinada a quente
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP	Agência Nacional do Petróleo
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CA	Concreto Asfáltico
CACT	Concreto Asfáltico com Cinza de termelétrica
CABC	Concreto Asfáltico com Biochar
CABIO	Concreto Asfáltico com Bio-óleo
CABIOCT	Concreto Asfáltico com Bio-óleo e Cinza de termelétrica
CABIOBC	Concreto Asfáltico com Bio-óleo e Biochar
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	Concreto Betuminoso usinado a quente
CP	Corpo-de-Prova
CPA	Camada Porosa de Atrito
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
GEOTEC	Grupo de Geotecnia
INPA	Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia
SMA	<i>Stone Matrix Asphalt</i>
TSD	Tratamento Superficial Duplo
TSS	Tratamento Superficial simples

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>18</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>18</b>
1.1 OBJETIVOS .....	20
1.1.1 Objetivo Geral .....	20
1.1.2 Objetivos específicos .....	20
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>21</b>
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>21</b>
2.1 CONCRETO ASFÁLTICO .....	21
2.2 ANÁLISE ECONÔMICA .....	22
2.2.1 Entrada e Saída de Recursos Financeiros .....	23
2.2.2 Indicadores de viabilidade econômica .....	25
2.3 SUSTENTABILIDADE NAS RODOVIAS .....	26
2.4 CINZA DE TERMELÉTRICA .....	27
2.4.1 Características físicas e químicas das cinzas .....	28
2.4.2 Processo de obtenção das cinzas volante e pesada .....	31
2.4.3 Cinza de termelétrica em misturas asfálticas .....	32
2.5 PIRÓLISE .....	33
2.6 BIO-ÓLEO .....	33
2.7 BIOCHAR .....	35
2.8 PLACA DE CIRCUITO IMPRESSA (PCI) .....	36
2.8.1 Impacto do descarte das PCI's na saúde e no meio ambiente .....	38
2.8.2 Resíduos de PCI's gerados na Zona Franca de Manaus (ZFM) .....	40
2.8.3 Biochar e Bio-óleo provenientes de PCI's em misturas asfálticas .....	41
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>43</b>
<b>3. MATERIAIS E MÉTODO</b> .....	<b>43</b>
3.1 DOSAGEM, MOLDAGEM E COMPACTAÇÃO EXEMPLIFICATIVA .....	44
3.2 CUSTOS UNITÁRIOS DOS INSUMOS .....	46
3.2.1 Materiais convencionais .....	46
3.2.2 Materiais alternativos .....	47
3.3 CUSTO DE PRODUÇÃO DO CONCRETO ASFÁLTICO USINADO .....	48
3.3.1 Materiais convencionais .....	48
3.3.2 Materiais alternativos .....	50
3.4 COMPARAÇÃO E ANÁLISE ECONÔMICA EM TRÊS CENÁRIOS .....	50
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>51</b>
<b>4 RESULTADOS</b> .....	<b>51</b>
4.1 DOSAGEM, MOLDAGEM E COMPACTAÇÃO .....	51
4.1.1 Dosagem .....	51
4.1.2 Moldagem e Compactação .....	52
4.2 AQUISIÇÃO DO PREÇO UNITÁRIO DOS INSUMOS .....	57
4.2.1 Materiais referência .....	57
4.2.2 Materiais alternativos .....	58
4.3 CUSTO DA PRODUÇÃO DO CONCRETO ASFÁLTICO USINADO .....	62
4.3.1 Materiais referência .....	62
4.3.2 Cinza de Termelétrica .....	67

<b>4.3.3 Biochar e bio-óleo</b> .....	<b>69</b>
<b>4.4 COMPARAÇÃO E ANÁLISE ECONÔMICA EM TRÊS CENÁRIOS</b> .....	<b>71</b>
<b>4.4.1 Primeiro Cenário</b> .....	<b>73</b>
<b>4.4.2 Segundo Cenário</b> .....	<b>75</b>
<b>4.4.3 Terceiro Cenário</b> .....	<b>77</b>
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>81</b>
<b>5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>81</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>83</b>

## CAPÍTULO 1

---

### 1 INTRODUÇÃO

Os meios de transporte constituem-se elementos fundamentais para o desenvolvimento da humanidade. Desta forma, a sociedade sempre buscou o deslocamento de pessoas e mercadorias, e, notadamente, que pudesse ocorrer de forma rápida e fácil. Nesse cenário, enfatiza-se o modal rodoviário, o qual segundo a Confederação Nacional do Transporte (CNT) constitui-se o de maior preferência dos usuários (CNT, 2019). Porém, ressalta-se que apenas 12,4% (213.453 km) das rodovias brasileiras são pavimentadas, o que mostra a fragilidade da malha rodoviária nacional.

No caso do Amazonas os dados são ainda mais preocupantes, tendo em vista que, segundo a CNT (2019), é o único Estado do Brasil no qual não há rodovias com classificação ótima ou boa, considerando as condições gerais da via e o pavimento. Assim, analisando a extensão total das estradas no Amazonas, cujo valor é de 1.046 km, tem-se o seguinte panorama: 26,9% péssimo, 7,6% ruim, 65,5% regular, 0% bom e 0% ótimo. Na Figura 1.1 pode-se observar um exemplo de trecho considerando em péssima condição localizado na BR-319, o qual contribui - dentre outros fatores - para elevar a insegurança dos usuários, danos aos veículos, bem como aumento no tempo de viagem e no consumo de combustível.



**Figura 1.1** - Trecho em más condições de tráfego na BR-319

**Fonte:** Paulo, 2019.

Salienta-se também, a localização da cidade de Manaus em uma bacia sedimentar, cujo subsolo é constituído por uma espessa camada de solo sobre o manto rochoso, o que consubstancia a escassez de material pétreo superficial na região. As jazidas mais próximas para obtenção de brita e de pó de pedra, localizam-se, em regra, à cerca de 180 km de Manaus,

no Município de Presidente Figueiredo. Portanto, acarretando alto custo do transporte para sua aquisição, o que onera o valor desses produtos na construção de pavimentos.

Além disso, é igualmente significativo o custo do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) nas formulações asfálticas, porquanto representa a maior parcela do valor unitário da tonelada de uma composição asfáltica. Enfatiza-se também os danos ambientais e à saúde que o mencionado ligante acarreta ao ser aquecido, uma vez que libera quantidades significativas de substâncias tóxicas (RIBEIRO SILVA RODRIGUES, 2006). Por tais razões, enseja pesquisas visando a sua substituição por materiais de menor custo e impacto ambiental.

O exposto motiva a busca por novos materiais, que aliem custo e sustentabilidade tão verbalizada em nossos dias, visando proporcionar maior vida útil aos pavimentos. Nessa vertente, destaca-se que nas usinas termelétricas são gerados dois subprodutos sólidos, quais sejam, a cinza leve e a pesada, nocivas ao meio ambiente. Causam poluição da água, ar e do solo (DAMPIER, 2013). Todavia, de acordo com Weber (2010), a utilização do citado material como substituto parcial do fíler em misturas asfálticas registrou satisfatórios resultados, com relação a resistência à tração (RT) e ao módulo de resistência (MR).

Nessa ótica, tem-se a pirólise, a qual promove a decomposição térmica de resíduos na ausência de oxigênio, tendo como resultado desse processo gases, bio-óleo e o biochar. Tais subprodutos, segundo Camargo (2018), torna-se uma alternativa de resíduos, principalmente considerando a sua produção em escala industrial por meio das denominadas “plantas de pirólise”. Nesse contexto e em conformidade com Yang (2013), a utilização do bio-óleo e do biochar proveniente da pirólise das Placas de Circuito Integrado (PCI) apresentam um bom futuro em misturas asfálticas, como substituto do CAP e do Pó de Pedra, respectivamente. Dentre as características que são melhoradas estão: Ponto de Amolecimento, Penetração e Ductilidade (CAMARGO, 2018).

Adita-se que o Polo Industrial de Manaus (PIM) gerou aproximadamente 18.178,06 toneladas (SUFRAMA, 2011) de resíduos de plástico polimerizado em processo, nos quais estão enquadradas as Placas de Circuito Integrado (PCI), fazendo da cidade de Manaus/AM uma grande geradora desses resíduos. Ressalta-se que as PCI's também contêm componentes tóxicos ou até mesmo cancerígenos (NUNES, 2010).

Desta forma, a pavimentação se constitui em um importante campo de aplicação de novos materiais, suscitando o desenvolvimento de pesquisas que visem alternativas para obtenção de uma técnica de construção rodoviária que leve a estruturas mais resistentes, de baixo custo e duráveis, sem impactar o meio ambiente.

Todavia, apesar da existência de pesquisas voltadas à análise da viabilidade técnica da

utilização dos citados materiais alternativos em misturas asfálticas (VASUDEVAN, 2013; YANG, 2013; WEBER, 2010), são raras as publicações sobre a análise de viabilidade econômica, considerando principalmente o Amazonas e a cidade de Manaus/AM, tornando pertinente o desenvolvimento deste estudo.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Analisar a viabilidade econômica da produção de misturas asfálticas usinadas a quente, com a participação de materiais alternativos, quais sejam o bio-óleo, substituindo o ligante asfáltico convencional, assim como a cinza de termelétrica e o biochar, pelo pó de pedra da composição tradicional, com vista à construção de pavimentos.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- a) Determinar a porcentagem ideal de substituição do pó de pedra pela cinza de termelétrica e biochar, bem como do ligante betuminoso convencional pelo bioligante;
- b) Obter o preço unitário dos insumos pó de pedra, brita 0, brita 1, areia média, cimento asfáltico de petróleo, cinza de termelétrica, biochar e bio-óleo;
- c) Adaptar as composições de custo unitário para a produção do Concreto Asfáltico (CA) contendo os materiais tradicionais e alternativos;
- d) Comparar os resultados do custo do CA tradicional relativos às formulações alternativas;
- e) Avaliar a viabilidade da implantação de plantas de pirólise, considerando três cenários, para a produção de biochar e bio-óleo.

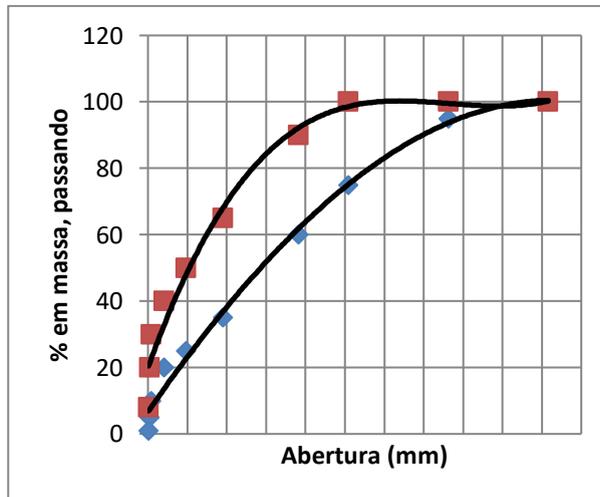
## CAPÍTULO 2

### 2 REVISÃO DE LITERATURA

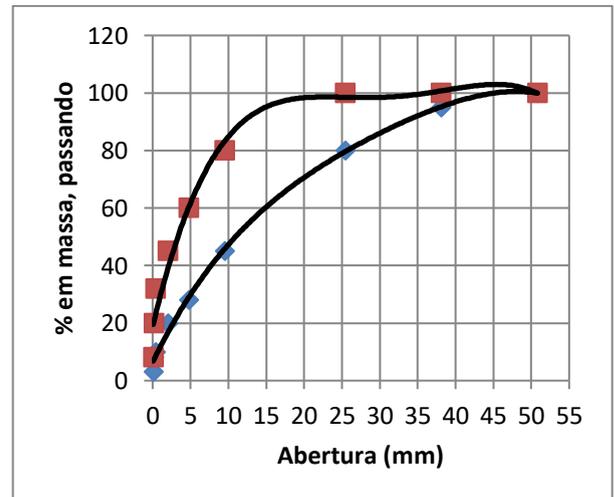
#### 2.1 CONCRETO ASFÁLTICO

As misturas asfálticas estão presentes na camada do pavimento denominada de revestimento, a qual é responsável por receber diretamente os esforços oriundos do tráfego, bem como é destinada a propiciar conforto e segurança aos usuários. Representativo dessas composições tem-se o Concreto Betuminoso Usinado a Quente ou Concreto Asfáltico (CBUQ/CA).

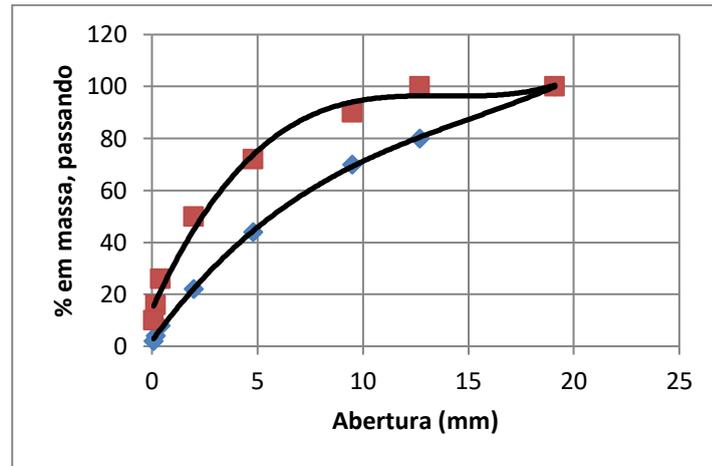
Específico ao CA, este pode ser definido como uma mistura adequada de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), material de enchimento (fíler), agregado miúdo e graúdo, sendo considerado o mais comumente empregado no Brasil. A sua granulometria deve ser enquadrada segundo prescrito em normas, caso das três faixas especificadas pela ES 031/2006 do DNIT (A, B e C) que caracteriza uma composição contínua e bem graduada, as quais podem ser visualizadas na Figura 2.1.



(a)



(b)



(c)

**Figura 2.1** – Granulometrias pelo DNIT: a) Faixa A; b) Faixa B; c) Faixa C

Quando a espessura do CBUQ for superior a 70 mm, ele normalmente é dividido em duas camadas, em que a primeira é denominada de binder e a segunda (superior) de capa. Ressalta-se que o teor de ligante que faz parte dessa formulação está entre 4,5% a 6% e a porcentagem de vazios varia de 3% a 5% e de 4% a 6% para as duas subdivisões, respectivamente (DNIT, 2006)

Ressalta-se que os procedimentos de dosagens dessas formulações asfálticas estão sendo estudados há algumas décadas (SOARES, 2003). Dentre os parâmetros utilizados neste processo está o Volume de Vazios (Vv), cuja determinação é feita com fundamento na Densidade Máxima Teórica da mistura (DMT) e da densidade aparente do corpo-de-prova compactado.

No Brasil, a DMT é calculada normalmente por meio de uma ponderação das densidades reais dos materiais que compõem a mistura. Todavia há diferentes formas de cálculo, ou determinação laboratorial da DMT, a qual, neste último caso, é denominada de Densidade Máxima Medida (DMM).

## 2.2 ANÁLISE ECONÔMICA

Conforme Lindemeyer (2008), por meio da viabilidade econômica obtém-se uma estimativa do gasto inerente ao investimento inicial, manutenção e operação de um empreendimento, bem como permite conhecer as receitas geradas ao longo do tempo, o que possibilita fomentar a criação do fluxo de caixa e consequentemente a aferição dos indicadores do projeto.

Consoante Cecconello (2007), em tal análise ocorre a determinação de parâmetros que recomendam ou não a aplicação de capital no objeto do estudo. Este processo acontece por meio da estimativa dos recebíveis e despesas considerando a remuneração e a simulação de cenários, tendo em vista condições mais ou menos favoráveis ao negócio.

Enfatiza-se que, o procedimento envolve três etapas: projeção dos valores a serem recebidos e os dispêndios, cálculo do valor de capital e aplicação de técnicas de verificação (CAIBRE, 2013). Nesse sentido, após a definição do horizonte temático, procede-se a coleta dos dados relevantes, a formulação das entradas e saídas de recursos financeiros e das despesas do financiamento para, em seguida, gerar a perspectiva do investimento (BRUNI e FAMÁ, 2003).

### **2.2.1 Entrada e Saída de Recursos Financeiros**

O fluxo de caixa se institui na sincronização dos ingressos e desembolsos de um determinado projeto ao longo de sua vida útil, no sentido de investigar, por meio de técnicas de análise, a viabilidade financeira de sua implantação (VIEIRA, 2007). Dentre os elementos que o compõe tem-se: vida econômica ou vida útil, receita líquida de vendas, custos operacionais, resultado bruto, despesas operacionais, despesas financeiras, depreciação, resultado operacional, imposto de renda e contribuição social, resultado líquido operacional, investimento inicial, capital de giro e Taxa Mínima de Atratividade (TMA). Apresentam-se, na sequência, as definições desses citados componentes de acordo com Unisanta (2013).

- a) Vida econômica ou útil do projeto: define-se como o horizonte de projeção em que um empreendimento deverá produzir resultados econômicos;
- b) Receita líquida de vendas: envolve todas as entradas de caixa provenientes de serviços e produtos, considerando os impostos que incidem sobre o faturamento, tais como: Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI), Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS), Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social (COFINS) e Programa de Integração Social (PIS);
- c) Custos Operacionais: referem-se aos gastos decorrentes da implementação de um investimento. Os mesmos podem ser subdivididos em fixos e variáveis. Relativamente aos primeiros tem-se que não são decorrentes diretamente dos produtos ou serviços vendidos, mas estão presentes independentemente do nível de produção como: seguros, taxas, manutenção dos equipamentos, depreciação, salário dos supervisores, controle de qualidade etc. No tocante aos dispêndios variáveis tem-se que os mesmos variam de acordo com a operação do projeto, por exemplo:

matéria-prima, embalagens, mão de obra, energia, combustível etc;

- d) Resultado Bruto: resulta da diferença entre a receita oriunda de vendas e os custos operacionais projetados, sem a consideração da depreciação e das despesas operacionais;
- e) Despesas Operacionais: podem ocorrer oscilações ao longo do tempo, cita-se: gastos com propagandas, promoção, comissão de vendedores, representantes e pesquisas de mercado;
- f) Despesas Financeiras: diz respeito à remuneração aos capitais de terceiros como: juros, comissões bancárias, correção monetária, descontos concedidos etc. É necessário que as mesmas sejam compensadas das receitas derivadas das aplicações, descontos obtidos, juros de mora recebidos, entre outros;
- g) Depreciação: consiste na redução do valor do bem que ocorre ao longo do tempo em decorrência do desgaste ou obsolescência tecnológica. No Brasil adota-se o Método Linear para o cálculo da depreciação, no qual a carga anual será a mesma até o final da vida útil do objeto analisado;
- h) Resultado Operacional: obtido a partir da diferença entre o resultado bruto e as despesas operacionais, despesas financeiras e depreciação;
- i) Imposto de Renda e Contribuição Social: são calculados considerando o resultado operacional;
- j) Resultado Líquido Operacional: é calculado pela diferença entre o item h e a provisão do imposto de renda, sendo o resultado que o projeto possuirá sem as dívidas financeiras.
- k) Investimento Inicial: diz respeito aos gastos executados no início do empreendimento. Soma-se todo o dispêndio realizado para iniciar a operação incluindo máquinas e equipamentos, despesas de montagem e treinamento de pessoal;
- l) Capital de Giro: versa sobre uma reserva para o cumprimento de obrigações que não estão contempladas no fluxo de caixa ordinário;
- m) Taxa Mínima de Atratividade (TMA): é um valor de referência no qual o investidor espera obter ganhos. Segundo Vieira (2007), a TMA pode ser determinada com base na porcentagem de rendimentos provenientes de uma aplicação de capital, caderneta de poupança, depósitos a prazo fixo e outros.

## 2.2.2 Indicadores de viabilidade econômica

Os indicadores de viabilidade econômica de projetos são decorrentes da movimentação de caixa. De acordo com Silva (2008), os três parâmetros mais utilizados para este estudo são: o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o Período de Retorno de Recuperação do Investimento (Payback).

Na ótica de Ceconello (2007), os métodos tradicionais de análise visam apresentar ao possível investidor três informações básicas para a tomada de decisão, que são: prazo de amortização (Payback), ganho líquido (VPL) e capacidade do projeto se pagar (TIR).

### 2.2.2.1 Valor Presente Líquido (VPL)

Conceitua-se Valor Presente Líquido (VPL) como um método de qualificação baseado na equivalência monetária atual do fluxo de caixa (CAIBRE, 2013). Nesse contexto, o VPL de um projeto é considerado como a diferença entre o valor presente das receitas e investimentos, trazidos à data zero (ASSAF NETO, 2014).

O cálculo do VPL pode ser realizado considerando a Equação 2.1.

$$VPL = \sum_{j=0}^n \frac{(RB - COT)}{(1 + i)^n} \quad (2.1)$$

Onde:

RB = Retorno ou Benefício esperado pela entrada de caixa, ou seja, fluxos operacionais.

COT = Fluxo de saída do empreendimento;

i = Taxa Mínima de Atratividade ou Requerida (TMA ou TMR) ou Taxa de Desconto (juros).

j = Número de períodos ou horizonte de investimento.

### 2.2.2.2 Payback

De acordo com Assaf Neto (2014), o período de Payback consiste na determinação do tempo necessário para que o valor dos desembolsos seja recuperado pelos benefícios incrementais líquidos promovidos pelo investimento. No sentido de aceitar ou rejeitar o projeto, deve-se compará-lo com um padrão-limite estabelecido pela empresa.

O referido índice frequentemente é interpretado como um importante valor do nível de risco de um projeto (ALBIERO, 2018). Logo, quanto maior é o prazo, os riscos envolvidos na decisão também serão. Desta forma, em épocas de incerteza da conjuntura econômica o limite-padrão definido pelas empresas é reduzido (AYMERICH, 2012).

### 2.2.2.3 Taxa Interna de Retorno (TIR)

A Taxa Interna de Retorno (TIR) representa a taxa de desconto que iguala as entradas com as saídas previstas de caixa. A fórmula para a determinação da TIR supõe a atualização de todos os movimentos para o momento zero, conforme pode ser observado na Equação 2.2.

$$I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{I_t}{(1 + K)^t} = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + K)^t} \quad (2.2)$$

Onde:

$I_0$  = montante do investimento no momento zero (início do projeto);

$I_t$  = valores previstos de investimentos no tempo subsequente;

$K$  = taxa de rentabilidade equivalente periódica (IRR);

$FC$  = fluxos previstos de entradas de caixa em cada período de vida do projeto.

De acordo com Silva (2008), a decisão pela aceitação ou rejeição do projeto deve ser realizada considerando a comparação da TIR, obtida com a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) que se baseia na menor rentabilidade esperada em relação aos investimentos (KRONBORB, 2013). Se o valor da TIR for superior a TMA, deve-se aceitá-lo, caso contrário, rejeitá-lo.

## 2.3 SUSTENTABILIDADE NAS RODOVIAS

Ao longo dos últimos anos intensificaram-se as pesquisas no sentido de buscar alternativas para mitigar os impactos causados pela ação do homem ao meio ambiente. Desta forma, diversos setores econômicos envidam esforços para criar e desenvolver materiais menos poluentes visando à substituição daqueles atualmente utilizados. Dentre os quais a Engenharia, que possui considerável representatividade na transformação de espaços e matérias-primas.

Em particular merece relevância a infraestrutura rodoviária, a qual segundo Trombulak e Frissel (2000) contribui com modificações no meio, distúrbios na fauna e flora, e alteração na estrutura natural do solo, bem como colabora na contaminação do lençol freático. Além disso, a aquisição de materiais para confecção da camada superficial dos pavimentos, caso dos agregados pétreos (brita) e do pó de pedra, envolve o desmonte de rochas por meio de explosivos que ocasionam problemas de vibração no substrato e o lançamento de elementos pulverulentos no ar (BACCI, 2006). Nesse contexto, pesquisas ao redor do mundo tem buscado a inserção de integrantes de menor impacto ambiental nas misturas asfálticas como os resíduos industriais e orgânicos (PÉREZ et al, 2019).

Nesse prisma, outro material de notável interesse são as cinzas de termelétricas, resultado da geração de energia elétrica. Logo, mostram-se importantes ao desenvolvimento de pesquisas visando o adequado aproveitamento desse resíduo, tornando-o uma importante alternativa no campo da pavimentação (WEBER, 2010).

Na mesma vertente ambiental frisa-se que o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), comumente usado nas misturas asfálticas, contribui negativamente ao meio ambiente, além de prejudicar a saúde das pessoas, devido ao seu aquecimento, pois libera quantidades significativas de substâncias tóxicas (LOPES, 2006). Portanto, pesquisas voltadas à sua substituição por materiais alternativos, como os bioligante, tem recebido destaque atualmente.

Dentre os procedimentos para a produção de bio-óleos tem-se a pirólise e a liquefação, os quais consistem em técnicas termoquímicas responsáveis pela geração de um composto com alto poder adesivo e propriedades semelhantes aos ligantes asfálticos (MYTHILI, 2013). Todavia, é importante acentuar que existe a possibilidade da produção sem a utilização dos referidos processos (CAMARGO, 2018). Nesse contexto, existe a lignina proveniente da madeira e dos óleos de feijão, cozinha e peixe, podendo de igual modo, participar das formulações (WANG, DEREWECHI, 2013).

#### 2.4 CINZA DE TERMELÉTRICA

Nas usinas termelétricas são gerados dois subprodutos sólidos: a cinza leve (volante) e a pesada, ambos nocivos ao meio ambiente (DAMPIER, 2013). Para Moghai (2017), globalmente, as centrais geradoras de energia estão sobrecarregadas com o problema da eliminação desses resíduos.

Ressalta-se que essas cinzas causam a poluição da água, ar e do solo. De acordo com Dutta et al., (2002), as mesmas são ricas em óxidos de Si, Al, Fe e Ca e pequenas quantidades de K, Mg, Na, Zn, S e N. Além disso, existe a concentração de íons metálicos, os quais podem ser adsorvidos na superfície das partículas ou na própria matriz (SIVAPULLAIAH e MOGHAI, 2010).

Esses materiais possuem componentes tóxicos, como os aromáticos, policíclicos hidrocarbonetos e metais pesados que podem ocasionar efeitos prejudiciais à saúde. Logo, a presença dessas partículas nos pulmões pode causar doenças graves como: silicose, fibrose, bronquite e pneumonite, além de aumentar o risco de câncer (USEPA, 2007).

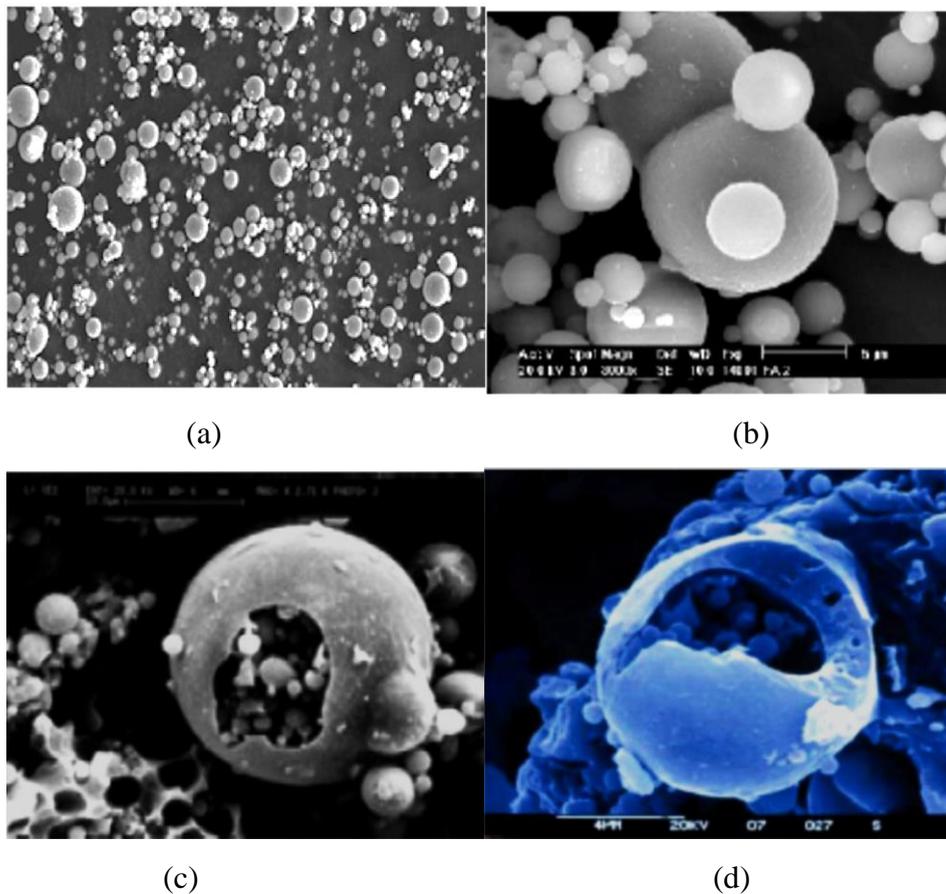
As suas propriedades dependem de fatores como a qualidade da matéria-prima utilizada, tipo da caldeira e a temperatura de queima (SILVA, 2005). Conforme Lopes (2011), os resíduos provenientes da combustão do carvão mineral são influenciados pela: composição, grau de

beneficiamento e moagem, manuseio e sistema de extração.

## 2.4.1 Características físicas e químicas das cinzas

### 2.4.1.1 Cinzas Volantes

Segundo Fernández (2009), as cinzas volantes são formadas essencialmente por partículas denominadas de “cenoosferas”, e outras chamadas de “pleroesferas”, as quais possuem estruturas esferoidais na região interna, conforme é possível observar na Figura 2.2.



**Figura 2.2** – a) Partículas esféricas que compõe as cinzas volantes; b) “cenoosferas”; c) e d) “pleroesferas”

**Fonte:** Fernández, 2009.

O diâmetro médio varia de 7 a 12  $\mu\text{m}$ , valor semelhante às partículas formadoras do cimento ou do pó de pedra (AZEVEDO, 2002). Vale ressaltar que, dimensões maiores que 125  $\mu\text{m}$  são porosas, o que se relaciona com a alta quantidade de carbono. Este material não queimado propicia o aumento da superfície específica das estruturas (XAVIER, 2016).

Elas possuem como principais elementos químicos os cristais de sílica ( $\text{SiO}_2$ ), óxido

férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e cal ( $\text{CaO}$ ). Em quantidades inferiores contêm outros componentes como:  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{TiO}_2$ . Ademais, também apresenta carbono que não foi consumido durante o processo de combustão (FERNÁNDEZ, 2009). Na Tabela 2.1 é possível observar a composição das cinzas volantes presentes na literatura.

Composição química (%)	Neves et al (1998)	Silva et al (1999)	Siqueira et al (2012)	Silveira, Silva e Guimarães (2014)
$\text{SiO}_2$	54,76	67,00 - 71,00	33,80	1,82 - 9,38
$\text{Al}_2\text{O}_3$	28,30	19,00 - 24,00	13,69	1,89 - 3,92
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	4,23	5,00 - 8,00	5,03	-
$\text{CaO}$	1,04	0,20 - 1,10	14,05	56,65 - 79,63
$\text{MgO}$	1,30	0,20 - 1,80	1,45	0,60 - 3,11
$\text{Na}_2\text{O}$	0,33	0,10 - 0,70	0,75	-
$\text{K}_2\text{O}$	2,84	0,40 - 1,50	1,20	0,24 - 0,47
$\text{SO}_3$	-	0,10 - 0,70	7,33	12,77 - 17,60
$\text{NiO}$	-	-	-	1,80
$\text{FeO}$	-	-	-	0,31 - 2,12
$\text{TiO}_2$	2,42	-	-	-
$\text{Li}_2\text{O}$	0,02		-	-
$\text{MnO}$			0,04	
$\text{Cu}$	-	36 - 55 (ppm)	-	0,21
$\text{S}$	0,08	-	-	-
$\text{V}$	-	-	-	0,48 - 6,84

**Tabela 2.1** – Composição química das cinzas volantes encontradas na literatura  
**Fonte:** Xavier, 2016.

#### 2.4.1.2 Cinzas Pesadas

As cinzas pesadas possuem superfícies irregulares, angulares, porosas, ásperas e com aparência e distribuição do tamanho da areia de rio (XAVIER, 2016). Conforme observado na Tabela 2.2, os grãos possuem em predominância o tamanho dos materiais arenosos, apresentando baixo teor de fração de argila sendo, portanto, classificados como granulares.

Procedência das cinzas	Diâmetro dos grãos em (%)				
	Argila	Silte	Areia fina	Areia média	Areia grossa
Usina Termelétrica de Charqueadas – RS	1	44	41	13	1
Aracruz Celulose S.A, Guaíba – RS	1	29	34	26	10
Presidente Médici, Candiota – RS	1	30	42	20	7

**Tabela 2.2** – Análises granulométricas realizadas em cinzas pesadas obtidas de diferentes origens  
**Fonte:** Zwonok, Chies e Silva, 2006.

Na Tabela 2.3 é possível observar as propriedades físicas desse tipo de cinza. A densidade varia de 1,40 a 2,5, absorção de água de 5,5% a 31,6% e o módulo de finura de 1,4 a 2,8. Esses parâmetros são alterados com a origem e o tipo do carvão.

Propriedades Físicas	Ghafoori e Bucholc (1996)	Bai <i>et al.</i> (2005)	Yukse e Genc (2007)	Naik <i>et al.</i> (2007)	Kou e Poon (2009)	Kim e Lee (2011)	Singh (2015)
Densidade	2,5	1,5	1,4	2,1	2,2	1,9	1,4
Absorção de água (%)	7,0	30,4	6,1	13,6	28,9	5,5	31,6
Módulo de finura	2,8	-	-	-	1,8	2,4	1,4

**Tabela 2.3** – Propriedades físicas das cinzas pesadas provenientes de termelétricas.  
**Fonte:** Singh, 2015.

Em termos de composição química as cinzas pesadas, possuem sílica, alumina e ferro, contendo pequenas quantidades de cálcio, magnésio, sulfatos etc. (XAVIER, 2016). Por meio da Tabela 2.4 nota-se que as propriedades físico-químicas variam com as partículas derivadas do carvão mineral, temperatura de pré-queima, grau de moagem, sistema de extração e transporte (LOPES, 2011).

Composição química (%)	Yuksel, Genc (2007)	Bai <i>et al.</i> (2005)	Aramraks (2006)	Kasemchaisiri, Tangtermsirikul (2007)	Muhardi <i>et al.</i> (2010)	Gafoori, Bucholc (1996)	Singh (2015)	Moulton (1973)*
SiO <sub>2</sub>	57,90	54,80	46,20	38,64	42,70	41,70	56,44	53,60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,60	28,50	23,11	21,15	23,00	17,10	29,24	28,30
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,50	8,49	8,62	11,96	17,00	6,63	8,44	5,80
CaO	2,00	4,20	12,12	13,80	9,80	22,50	0,75	0,40
MgO	3,20	0,35	2,90	2,75	1,54	4,91	0,40	4,20
Na <sub>2</sub> O	0,09	0,08	0,55	0,90	0,29	1,38	0,09	1,00
K <sub>2</sub> O	0,60	0,45	2,13	2,06	0,96	0,40	1,29	0,30
TiO <sub>2</sub>	-	2,71	-	-	1,64	3,83**	3,36	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0,28	-	-	1,04		-	-
SO <sub>3</sub>	-	-	0,42	0,61	1,22	0,42	0,24	-

**Tabela 2.4** – Composição química das cinzas pesadas encontradas na literatura

**Fonte:** Xavier, 2016.

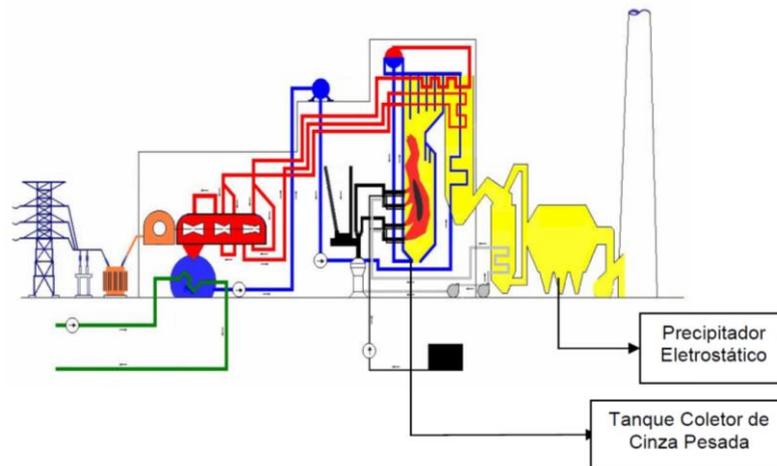
#### 2.4.2 Processo de obtenção das cinzas volante e pesada

As cinzas das usinas termelétricas são propiciadas pela combustão do carvão pulverizado que ocorre dentro das caldeiras, produzindo o vapor aquecido que movimenta as turbinas e ocasiona a geração de energia elétrica (FABBRI, 2005). O fato de haver diferentes zonas térmicas no interior do processo contribui para a formação de partículas com diversas características.

Conforme Fernández (2009), a presença de alta temperatura ocasiona a formação de estruturas arredondadas enquanto as mais baixas tendem a formar menor grau de arredondamento. Salienta-se que a produção de eletricidade pode ocorrer por queima a seco ou úmida.

No caso da primeira (seco), aproximadamente 80% do material que não é queimado, constitui-se na cinza volante a qual é conduzida por dutos até os precipitadores eletrostáticos, que ficam posicionadas antes da chaminé de exaustão (FABBRI, 2005). Os outros 20% são elementos pesados, acumulado em um tanque após sua retirada por meio da ação da gravidade.

Na segunda condição (úmida), a cinza é mantida em um estado fundido, sendo extraída na forma de um líquido, o qual é posteriormente resfriado em jatos d'água (FERRET, 2004). Ressalta-se que, no momento do contato com a água ocorre a formação de frações pesadas, um material grosso, duro, negro, angular e vítreo (FABRI, 2005). Na Figura 2.3 visualiza-se um esquema de geração de energia e de resíduos.



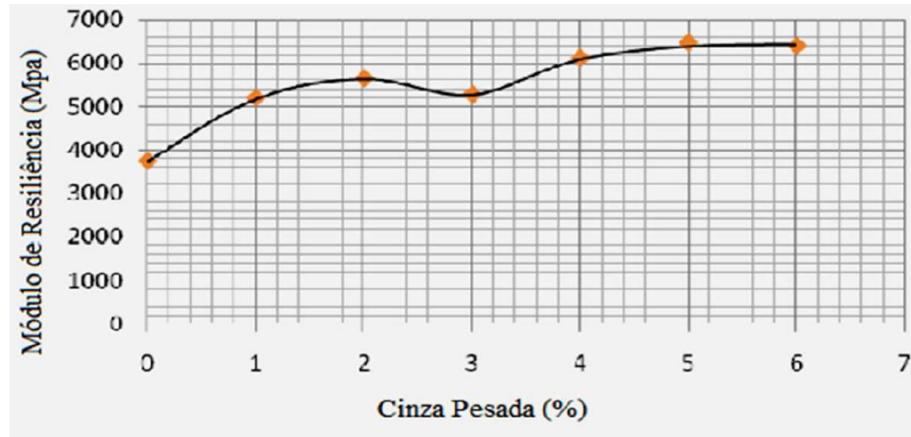
**Figura 2.3** – Esquema de geração de energia elétrica e produção de cinzas leves e pesadas.  
**Fonte:** Fabbri, 2005.

### 2.4.3 Cinza de termelétrica em misturas asfálticas

Variados estudos indicam grande potencial para o uso das cinzas de termelétricas em: aditivos para cimento, fabricação de blocos e tijolos (CALARGE et. al., 2000; CHIES et. al., 2003), produtos cerâmicos especiais (OZDEMIR et. al., 2001), painéis anti-incêndio (VILCHES, 2002), controle de erosão (TISHMACK, 2001), produção de vidros (EROL et. al., 2007) e pavimentação (VASSILEV et.al., 2001; HALL e LIVINGSTON, 2002).

Para Weber (2010), a utilização em composições asfálticas a quente se mostrou eficiente, apresentando resultados satisfatórios com relação a resistência à tração superiores a 0,65 MPa, recomendado pela norma DNIT – ES – 31. Entretanto, devido à alta porosidade desses resíduos, foi necessário maior quantidade de ligante, se comparada às formulações contendo fíleres naturais.

Vasudevan (2013) verificou que ao aumentar o percentual de cinza adicionada como filer ocorre o incremento do Modulo de Resiliência (MR) das misturas. Por meio da Figura 2.4 é possível analisar os valores do MR para os percentuais de 1%, 2%, 3%, 4%, 5% e 6%. Observa-se que, em 5,1% o MR ficou em torno de 3,732 MPa.



**Figura 2.4**– Módulo de Resiliência (MR) de mistura asfáltica contendo cinza pesada como fíler  
**Fonte:** Adaptado de Vasudevan (2013).

## 2.5 PIRÓLISE

A pirólise consiste em um processo de decomposição térmica da biomassa ou de outros materiais, que ocorre na ausência de oxigênio, sendo que a condensação dos gases voláteis possibilita a produção do bio-óleo e do biochar (BRIDGWATER, 2012; YANG, MILLS-BAELE; YOU, 2017).

De acordo com Yang (2013), este bioligante apresenta maior quantidade de oxigênio que o asfalto, posto que a fração deste elemento químico varia de 10% a 45%, dependendo do material de origem, enquanto no material convencional constitui-se de aproximadamente 1%, o que torna o bio-óleo mais suscetível a oxidação e com menor estabilidade térmica (LUCENA, 2005).

O rendimento dos derivados da pirólise depende do tempo e da temperatura de reação, podendo ser rápido ou lento. Por conseguinte, na ótica de Bridgwater (2012), recomenda-se o processo moroso quando o objetivo for a produção de maior fração de carvão mineral, o que leva mais de um dia para sua conclusão, enquanto o procedimento realizado de forma célere necessita de apenas alguns segundos para ser concluído e altas temperaturas.

Assim, nos últimos anos, buscou-se a criação de estruturas denominadas plantas de pirólise, no sentido de possibilitar produções compatíveis com a demanda de mercado e consequentemente viabilizar economicamente como alternativa a destinação de resíduos.

## 2.6 BIO-ÓLEO

O petróleo e seus derivados são responsáveis atualmente por suprir a demanda mundial de energia. Entretanto, este modal contribui para liberação de altas concentrações de substâncias

tóxicas e gases do efeito estufa, o que prejudica a saúde pública, causa desequilíbrios ambientais, além de serem finitos (CHEN et al., 2008).

Desta forma, o bio-óleo originário de microalgas, resíduos de animais, vegetais, urbanos e industriais torna-se uma das alternativas mais promissoras para resolver o problema do uso excessivo do asfalto, tendo em vista que ele pode modificar ou substituir parcialmente os ligantes convencionais (YANG, 2013).

Sublinha-se que o uso deste material na confecção de misturas asfálticas ainda é incerto, considerando as metodologias existentes para o estudo e a sua caracterização (CAMARGO, 2018). Conforme Fini et. al., (2017), a origem dos resíduos e sua fabricação podem interferir nas propriedades reológicas e físicas. Para Raouf e Williams (2009), é possível o seu uso como substituto ao CAP.

Na ótica de Camargo (2018), dentre os principais centros científicos mundiais voltados à pesquisa de bioligantes estão: (I) Universidade Estadual de Iowa, na produção de um material derivado da pirólise de matérias-primas de origem vegetal; (II) Universidade Agrícola e Técnica do Estado da Carolina do Norte, Universidade Batista da Califórnia e Universidade Tecnológica de Michigan, na confecção de uma substância a partir de dejetos suínos; (III) Universidade de Nottingham e Instituto Francês de Ciência e Tecnologia dos Transportes (IFFSTAR), com estudos voltados para a viabilidade de um composto contendo resina de pinho (80%) e óleo de linhaça (20%).

Sublinha-se ainda as pesquisas nas quais a matéria-prima é a madeira, caso do trabalho de Raouf e Williams (2009), pioneiro no estudo de um substituto integral ao ligante asfáltico convencional (CAMARGO, 2018). Utilizou-se pelos referidos autores: carvalho, palha de milho e gramíneas, as quais foram submetidas a pirólise para a produção de três tipos distintos de bioligantes. Dentre as conclusões obtidas estava a necessidade da realização de um pré-tratamento em função da liberação de significativas quantidades de vapores ao longo do processo de aumento da temperatura. Logo, aqueceram o material asfáltico a 110°C, por duas horas, o que ocasionou a sua maior suscetibilidade relativo aos ligantes betuminosos convencionais. Frisa-se que o bio-óleo possui um teor de água que varia de 16% a 40% de seu peso (DAVID, 2014).

Com relação ao processo de pré-tratamento, enfatiza-se a publicação de Yang, Mills-Beale e You (2014). Substituíram o CAP habitual por um material oriundo da pirólise de resíduos de madeira, nas porcentagens de 30% e 70%. Dentre as conclusões da pesquisa, constata-se a redução da viscosidade quando submetido à adição de bioligante com a presença da fração líquida. Todavia, quando o material está sem água notou-se viscosidade superior ao

CAP usual.

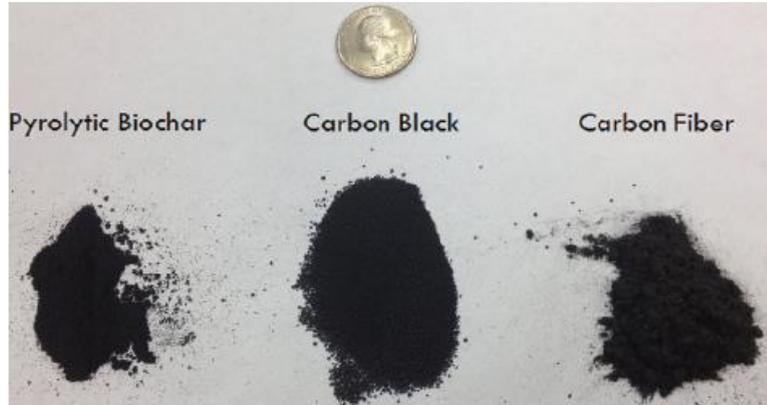
Nesse sentido, e considerando os resultados das pesquisas de Mohammad et.al., (2013) e Yang et.al., (2014) constata-se que o uso do bio-óleo como aditivo contribui para melhorar o desempenho do CAP em altas temperaturas. Por conseguinte, resultando na menor probabilidade da ocorrência de trilhas de rodas por deformação permanente.

No que tange ao comportamento mecânico, tem-se o trabalho de Mohammad et.al., (2013), demonstrando que a adição na proporção de 50% em relação a massa do ligante asfáltico PG 58-28, aumentou a resistência à deformação permanente e reduziu a vida de fadiga. Todavia, Yang et.al., (2014) atestou que a incorporação de 5% mostrou um efeito contrário ao verificado por Mahamad et al (2013), ou seja, houve melhoria na vida de fadiga das composições e redução do desempenho a deformação permanente. Reforça-se que nesses estudos há uma diferença da porcentagem de substituição do ligante convencional pelo material alternativo.

## 2.7 BIOCHAR

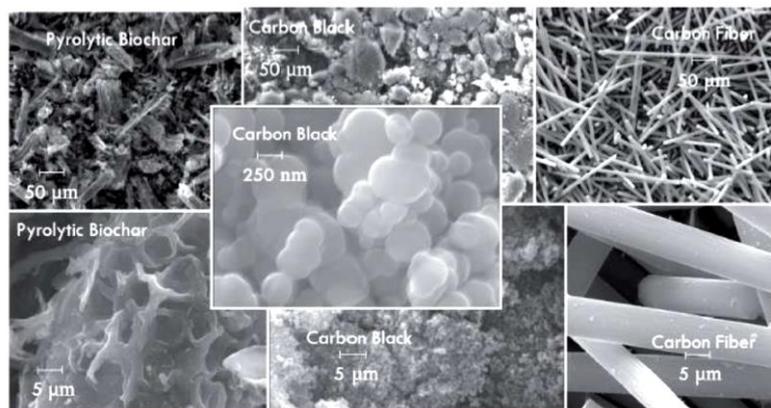
O biochar é originário da fração sólida proveniente do processo de pirólise. Isto reafirma o fato de que as propriedades desse material, o poder calorífico e o rendimento, dependem da matéria-prima que o gerou, dentre as quais cita-se: resíduos industriais, soja, grama e bagaço da cana de açúcar.

Em concordância com Lima (2016), sua descoberta ocorreu por meio de estudo de solos amazônicos antropogênicos, conhecidos como Terra Preta de Índio, os quais possuem alta fertilidade e produtividade, decorrente da adição de carbono pirogênico pelos índios, por intermédio da incorporação de resíduos de carvão vegetal no terreno (FALÇÃO, 2006). De tal modo que, o biochar a partir da biomassa e de resíduos industriais torna-o uma excelente alternativa técnica, econômica e ambiental para o aproveitamento de resíduos (LEHMANN & JOSEPH, 2009). Nas Figuras 2.5 e 2.6 observa-se este material sendo comparado a outros tipos de carvão.



**Figura 2.5** - Biochar, fibra de carbono e negro de fumo

**Fonte:** Zhao, 2014.

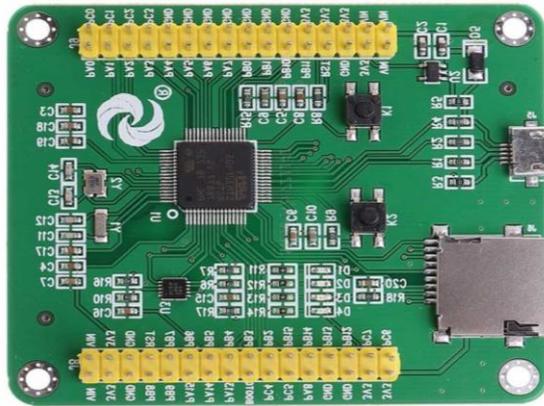


**Figura 2.6** - Microscopia do biochar, fibra de carbono e do negro de fumo

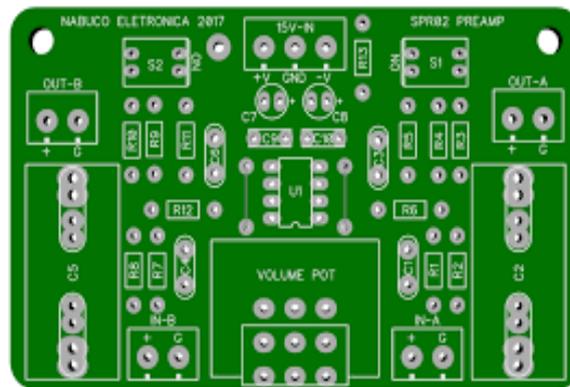
**Fonte:** Zhao, 2014.

## 2.8 PLACA DE CIRCUITO IMPRESSA (PCI)

Para Medeiros (2015), as Placas de Circuito Impressas (PCI) são utilizadas para a acomodação de materiais, sendo altamente empregadas na indústria eletrônica, tornando-se uma das partes principais desses equipamentos. Dentre os elementos que compõem as PCI's encontram-se: resistores, capacitores, diodos, dissipadores térmicos, transformadores, circuitos integrados, conectores e bobinas, os quais são os integrantes metálicos da estrutura. Por meio da Figuras 2.7 e 2.8, observa-se uma PCI com e sem componentes, respectivamente.



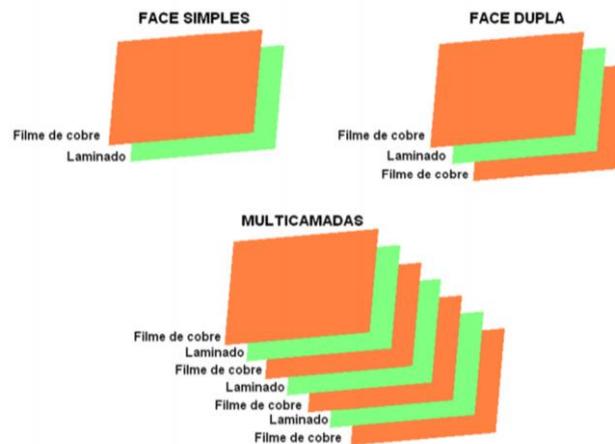
**Figura 2.7** – Placa de Circuito Integrado com componentes eletrônicos  
**Fonte:** 3D-top seller, 2020.



**Figura 2.8** – Placa de Circuito Integrado sem componentes eletrônicos  
**Fonte:** Nabuco Eletrônica, 2017.

O substrato da PCI padrão é constituído de resina epóxi, fibra de vidro e cobre, sendo que os materiais não metálicos (cerâmicos e plásticos) são retardantes de chama e contribuem para prover segurança aos equipamentos eletrônicos (TOZZI, 2017). Em harmonia com Moraes (2011), as PCI's são classificadas de acordo com a sua tecnologia e podem ser de faces simples, duplas ou multicamadas.

Nas primeiras ocorre o revestimento por cobre em somente uma das camadas, nas duplas aparece nos dois estratos e nas multicamadas ocorre a existência de 4 a 16 substratos de fibra de vidro (MORAES, 2011). Na Figura 2.9 é possível visualizar um esquema de classificação das PCI's.



**Figura 2.9** – Esquema da classificação das Placas de Circuito Impresso  
**Fonte:** Moraes (2011).

Dependendo da complexidade do circuito torna-se necessária a existência de vários isolantes com trilhas condutoras em cobre, no sentido de possibilitar a interconexão entre os componentes eletrônicos implantados nas PCI's. Logo, é indispensável a produção de placas em inúmeros formatos e dimensões, uma vez que cada aplicação resulta em diferentes concepções de projeto (LUDA, 2011).

### 2.8.1 Impacto do descarte das PCI's na saúde e no meio ambiente

De acordo com Naia (2014), com o intuito de aumentar a resistência à propagação de chamas são adicionados retardadores bromados (BFR – Bromated Flame Retardants), cujos três tipos principais são o Polibromobifenilo (PBB), o Éter difenilpolibromado (PBDE) e o Tetrabromobisfenol – A (TBBPA), os quais podem liberar dioxinas e furanos com a temperatura a que são submetidos.

Enfatiza-se que as primeiras são formadas por dois anéis benzênicos ligados por duas moléculas de oxigênio. A estrutura possui dois átomos de cloro que podem estar em oito posições diversas, o que possibilita 75 tipos de dioxinas ao total. Os furanos são semelhantes, diferenciando-se pelo fato de haver um átomo de oxigênio a menos possibilitando a existência de 135 diferentes combinações. Do total de 210 tipos existentes, 17 são tóxicos ou carcinogênicos (NUNES, 2010).

Os retardantes de chama bromados são utilizados devido ao seu baixo custo, alto desempenho e por resultarem em pouca ou nenhuma interferência nas matrizes poliméricas (JUHASZ et.al., 2010). O seu uso está sendo cada vez mais controlado em países que possuem legislações ambientais restritivas, o que contribui para a aplicação de materiais não halogenados

como os derivados de fósforo e as melaninas.

Contudo, essa nova geração apresenta dificuldades de emprego, pois se torna necessária maior quantitativo de aditivo para conseguir o grau mínimo de resistência ao fogo (NAIA, 2014). Esse acréscimo resulta em alterações das propriedades químicas, físicas, mecânicas e morfológicas dos polímeros, além do aumento da despesa de produção.

Considerando o cobre presente nas PCI's e os componentes eletrônicos, os impactos ambientais e à saúde são majorados. Conforme Zhang et.al., (2004), encontra-se presente nos capacitores: tântalo (Ta) nos chips e dispositivos semicondutores, silício (Si), germânio (Ge), gálio (Ga), índio (In), titânio (Ti), arsênio (As), selênio (Se) e telúrio (Te). As soldas podem conter estanho (Sn), chumbo (Pb), prata (Ag) e cádmio (Cd). Adita-se o fato de nas conexões haver a presença de alumínio (Al) ou ouro (Au). No Quadro 2.1 é possível observar tais elementos químicos, dentre outros, quanto ao uso e exposição, bem como seus efeitos a saúde.

Substância	Uso e Exposição	Efeitos à saúde
Cádmio	Aplicado nos contatos das PCI's, pó fosforescente dos TRC's, chips, semicondutores e como estabilizante do PVC. A maior exposição ocorre nos locais de trabalho, onde os produtos com cádmio são fabricados ou reciclados, principalmente por meio de inalação do ar contaminado (GUO <i>et al.</i> , 2009).	Carcinogênico para seres humanos. Danos aos pulmões, doenças renais e irritação no aparelho digestivo.
Chumbo	Utilizado nas soldas das PCI's, lâmpadas e no vidro dos TRC's. A disposição final de produtos contendo chumbo nos RSD pode contribuir para sua presença nos aterros sanitários. A exposição ao chumbo ocorre pela inalação da poeira nos locais de trabalho, como instalações de reciclagem, onde EEE são quebrados ou triturados (MJC, 2004; OECD, 2003).	Acumula-se no ambiente, produzindo efeitos tóxicos agudos em plantas e animais. Em seres humanos podem causar danos aos sistemas nervoso central e periférico e ao sistema endócrino.
Cristal líquido	São incorporados entre finas camadas de vidro e elementos de controle elétrico de visores. Cerca de 250 substâncias diferentes podem ser utilizadas na sua formulação. São comercializados mais de mil tipos. Um monitor de <i>notebook</i> pode conter cerca de 0,5g (TSYDENOVA e BENGTTSSON, 2011).	Os cristais líquidos são suspeitos de serem perigosos, mas estudos sobre a sua toxicidade são escassos (TSYDENOVA e BENGTTSSON, 2011).
Dioxinas e Furanos	Compostos produzidos na combustão incompleta de substâncias orgânicas e cloro, como o PVC. A exposição direta ocorre por meio das emissões na atmosfera, e de modo indireto por contaminação do solo, alimentos, água e outros. Os plásticos com retardantes de chama obtidos na reciclagem de REEE tem o potencial de produzi-los (TERAUCHI <i>et al.</i> , 2009).	São persistentes e bioacumulativos no ambiente. Alteram o metabolismo dos hormônios por meio de modificação das enzimas, as quais causam reações biológicas e fisiológicas: atrofia do timo e supressão da produção de anticorpos.
Mercúrio	Usado em termostatos, lâmpadas de descarga, barômetros, termômetros e baterias. A exposição ocorre por inalação do ar e ingestão de água ou alimento contaminado. As ocupações com maior potencial para a exposição ao mercúrio são nas fábricas de EEE e nas instalações de reciclagem (OECD, 2003).	A exposição a níveis elevados do mercúrio pode danificar o cérebro, os rins e o feto em formação. Os efeitos no cérebro podem resultar em irritabilidade, timidez, tremores, alterações na visão ou audição e problemas de memória.

PCB – Bifenilapoliclora	Usadas como fluídos refrigerantes e isolantes em transformadores, capacitores e outros EEE. Acumulam-se no tecido gorduroso, fazendo com que a exposição ocorra por meio do consumo de peixe ou outros predadores no topo da cadeia alimentar e também outros alimentos (FRAZZOLI <i>et al.</i> , 2010).	Os efeitos na saúde incluem problemas de pele nos adultos e mudanças neurocomportamentais e imunológicas em crianças. Conhecidos por causarem câncer em animais.
Retardantes de chama bromados	Empregados como aditivos em plásticos e espumas de produtos como monitores de computador, televisões, espuma, cabos e condutores para torná-los resistentes à chama. A exposição pode ocorrer em instalações onde os EEE são reciclados ou armazenados (MORF <i>et al.</i> , 2005).	São desreguladores endócrinos. Seus efeitos sobre os hormônios da tireóide estão demonstrados, entretanto efeitos sobre outros sistemas hormonais são desconhecidos.

**Quadro 2.1** – Substâncias perigosas, exposição, uso e efeitos a saúde

**Fonte:** Adaptada de Rodrigues (2012).

### 2.8.2 Resíduos de PCI's gerados na Zona Franca de Manaus (ZFM)

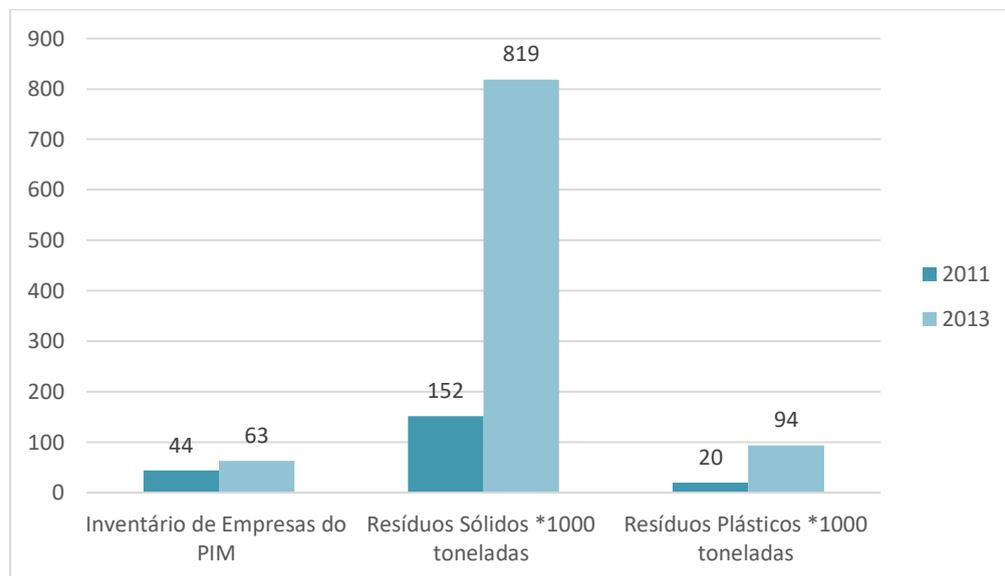
O Amazonas é o maior estado brasileiro em dimensões territoriais, 1.570.745 km<sup>2</sup>, possui 62 municípios e uma população de aproximadamente 4.144.597 pessoas (IBGE, 2019). Nesse local está presente a floresta amazônica, maior bioma brasileiro, contendo grande riqueza biológica e natural. Nesse contexto, o desenvolvimento econômico e a preservação da natureza intrínsecos da região sempre pareceram estar uma dicotomia, tendo em vista que o progresso foi acompanhado de intensa degradação ambiental (MEIRELES, 2016).

Em 1967 implantou-se na região a Zona Franca de Manaus (ZFM), que movimentou a economia até os dias atuais. Foi criada pelo Governo Federal do Brasil em 28 de fevereiro de 1967, por meio do Decreto-lei n. 288, correspondendo a uma área física de 10.000 km<sup>2</sup> e abrangendo parte dos municípios de Manaus, Itacoatiara e Rio Preto da Eva. A ZFM possui o objetivo de viabilizar uma base econômica de forma sustentável para a região, promover o desenvolvimento no interior da Amazônia Ocidental, bem como gerar emprego e renda (MEIRELES, 2016). A Superintendência da Zona Franca de Manaus (SUFRAMA), autarquia vinculada ao Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, é responsável pela sua administração.

A cidade de Manaus/AM com população aproximada de 2.182.763 pessoas (IBGE, 2019), é o local onde está instalado o Polo Industrial de Manaus (PIM), o qual se constitui no centro financeiro do Amazonas. As fábricas implantadas no PIM recebem incentivo fiscal de até 40%, os quais foram instituídos com o objetivo de alavancar o processo de desenvolvimento da região e reduzir desvantagens logísticas (JICA/SUFRAMA, 2010).

Em particular, a SUFRAMA é responsável por organizar e sistematizar o Inventário Anual de Resíduos Sólidos do PIM, exigência imposta pela resolução CONAMA n. 313/2002. Neste documento tem-se a necessidade em descrever a forma como os resíduos são armazenados, transportados e destinados.

Segundo Meireles (2016), a falta de políticas públicas de incentivos e fiscalização, está ocasionando uma lacuna no tocante a avaliação do desempenho e de informações. Em conformidade com o levantamento mais recente atinente ao ano de 2013, cujos dados foram disponibilizados por 63 fábricas, gerou-se aproximadamente 94 mil toneladas de resíduos plásticos (SUFRAMA, 2014). No gráfico 2.1 é possível visualizar o crescimento entre os anos de 2011 e 2013.



**Gráfico 2.1** – Crescimento da geração de resíduos sólidos entre os anos de 2011 e 2013 no Polo Industrial de Manaus.

**Fonte:** SUFRAMA, 2014.

Considerando somente os resíduos de plástico polimerizado em processo, o PIM gerou aproximadamente 18.178,06 toneladas em 2011 (SUFRAMA, 2012). Este quantitativo seria suficiente para atender a demanda de matéria-prima das plantas de pirólise e, conseqüentemente, produzir bio-óleo e biochar em quantidade adequada para suprir as necessidades das usinas de mistura asfáltica localizadas no âmbito de Manaus/AM.

### 2.8.3 Biochar e Bio-óleo provenientes de PCI's em misturas asfálticas

A quantidade crescente de equipamentos elétricos e eletrônicos está ocasionando um grande volume de Placas de Circuito Impresso (PCI's). Nesse cenário, considerando os componentes valiosos e perigosos que as PCI's possuem, merece atenção a eliminação e o descarte desses materiais (TOZZI, 2017).

Nesse sentido, tem-se a pirólise como importante alternativa para o tratamento desses resíduos. Apoiado em Long et.al., (2010), este processo tem a vantagem sobre os métodos

convencionais, tendo em vista que ela possibilita o reaproveitamento integral do substrato das PCI's para a produção de bio-óleo e biochar.

A utilização dos derivados das PCI's apresenta um futuro promissor em aplicações nos revestimentos asfálticos dos pavimentos rodoviários. Em seu estudo a composição de CAP tradicional foi substituída pelo bio-óleo nas proporções de 2%, 4%, 6%, 8% e 10%. Dentre as características melhoradas constam: Ponto de Amolecimento, Penetração e Ductilidade (YANG, 2013).

Os asfaltos são amplamente utilizados na pavimentação de estradas, porém este material é altamente suscetível a mudanças de temperatura em função de suas propriedades reológicas. Grande ênfase foi colocada na melhoria do desempenho do asfalto e o uso de polímeros como modificadores de asfalto é considerada uma mudança relativamente nova e interessante, porque envolve dois aspectos importantes: o uso de resíduos (baixo custo) e a valorização das propriedades do asfalto (MARQUES, 2013). Para o autor, as fibras de vidro e resinas em pó contidas nas PCI's podem ser usadas para reforçar o asfalto propiciando um ganho ambiental e econômico.

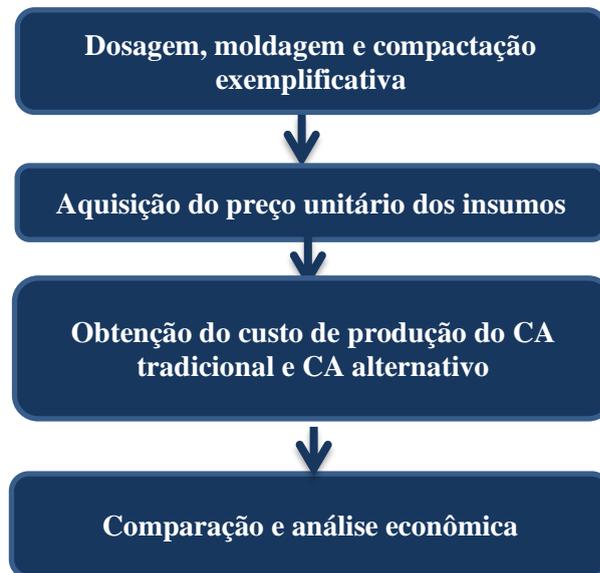
A reciclagem por meio da pirólise é considerada por Guo et al. (2009) como um método eficaz para tirar o máximo proveito de todos os elementos e eliminar todos os componentes perigosos e tóxicos contidos nas PCIs. Corroborando, Long et.al., (2010) relatou a respeito da reciclagem com componentes das PCI's por meio da pirólise à vácuo e separação mecânica. Salienta-se que se a temperatura for alta o suficiente, o processo derreterá a solda usada para fixar os componentes elétricos aos circuitos impressos, contribuindo para a separação da composição metálica da orgânica (HALL e WILLIAMS, 2007).

## CAPÍTULO 3

---

### 3. MATERIAIS E MÉTODO

Nessa seção apresentam-se os materiais utilizados e a metodologia empregada para a análise da viabilidade econômica, conforme demonstra de forma sucinta a Figura 3.1.



**Figura 3.1-** Fluxograma contendo a metodologia da pesquisa

A análise principal consistiu em obter e comparar o custo da produção do concreto asfáltico tradicional, contendo os materiais convencionalmente utilizados (pó de pedra, brita 0, brita 1, areia e cimento asfáltico de petróleo), relativo ao preço da formulação alternativa, considerando a substituição do pó de pedra pelos materiais cinza de termelétrica e biochar, e de parte do CAP tradicional pelo bio-óleo. Salienta-se que se considerou o biochar e bio-óleo provenientes da pirólise usando Placa de Circuito Impresso (PCI's), tendo como motivação os benefícios ambientais pela reciclagem de resíduos e a engenharia de pavimentos (YANG, 2013).

Avaliou-se a produção industrial dos materiais alternativos citados (cinza de termelétrica, biochar e bio-óleo) para a obtenção de preço de mercado. Nesse contexto, também foi observada a implantação de uma planta de pirólise em três cenários distintos. O primeiro no sentido de atender a demanda interna de uma usina de mistura asfáltica, o segundo com 20% para o referido fim e 80% comercializado no mercado local e o terceiro supondo 100% da produção vendida para usinas localizadas na capital do Amazonas e região. Ao final, efetivou-se a análise

de viabilidade econômica em conformidade com os seguintes parâmetros: Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Período de Recuperação do Capital Simples (Payback).

### 3.1 DOSAGEM, MOLDAGEM E COMPACTAÇÃO EXEMPLIFICATIVA

As formulações asfálticas de referência foram produzidas com os seguintes insumos: CAP 50/70 (ligante betuminoso), brita 0, brita 1 (agregados graúdos), areia (agregado miúdo) e pó de pedra, sendo produzidas com base nas proporções visualizadas na Tabela 3.1 e denominadas de CA. Tais quantitativos fundamentam-se na dosagem representativa de construção e manutenção das vias de Manaus, no caso expresso pela empresa Ardo Construtora e Pavimentação LTDA.

<b>Amostra</b>	<b>Brita 0</b>	<b>Brita 1</b>	<b>Pó de pedra</b>	<b>Areia média</b>	<b>CAP 50/70</b>
CA 01	28,2%	14,8%	28,2%	23,8%	5%
CA 02	28,2%	14,8%	28,2%	23,8%	5%

**Tabela 3.1** - Dosagem utilizada na pesquisa

Na confecção da composição alternativa, chamada de CT, considerou-se o teor de substituição do pó de pedra pela cinza de termelétrica, segundo os valores iguais a 2%, 4%, 6% e 8%, cujo resultado visualiza-se na Tabela 3.2. Inicialmente pesaram-se os materiais conforme a dosagem constante na citada tabela, na sequência foram misturados à temperatura de 165°C, fundamenta no trabalho de Camargo (2018).

<b>Amostra</b>	<b>Brita 0</b>	<b>Brita 1</b>	<b>Pó de pedra</b>	<b>Areia média</b>	<b>CAP 50/70</b>	<b>Cinza de termelétrica</b>
CT 01	28,2%	14,8%	26,79%	23,8%	5%	1,41%
CT 02	28,2%	14,8%	25,94%	23,8%	5%	2,26%
CT 03	28,2%	14,8%	25,38%	23,8%	5%	2,82%
CT 04	28,2%	14,8%	17,85%	23,8%	5%	5,95%

**Tabela 3.2** - Porcentagem de cada componente que foi utilizada na mistura asfáltica de referência obtida em laboratório

A moldagem e compactação dos corpos de prova baseou-se no processo Marshall (DNER-ME 043/1995). Desta forma, determinaram-se os parâmetros volumétricos, sendo

calculada a princípio a massa específica aparente da mistura asfáltica compactada ( $G_{mb}$ ) pela norma ASTM D 1188 ou D 2726 e a Equação 3.3. Além disso, definiu-se a massa específica máxima medida ( $G_{mm}$ ), conhecida como densidade Rice, segundo o que James Rice desenvolveu como procedimento de teste, obedecendo às diretrizes da ASTM 2041 (2000) ou AASHTO T 209 (1999).

$$G_{mb} = \frac{M_s}{M_{SSS} - M_{SSSub}} \cdot 0,9971 \quad (3.1)$$

Onde:

$M_{SSS}$  = massa do corpo de prova compactado na condição de superfície saturada seca, g/cm<sup>3</sup>;

$M_{SSSub}$  = massa (g) do corpo de prova compactado na condição de superfície seca e posteriormente submerso em água, g/cm<sup>3</sup>;

0,9971 = massa específica da água a 25°C, g/cm<sup>3</sup>.



**Figura 3.2** - Corpos de prova cilíndricos conforme norma DNER-ME-043/2005

Partindo dos mencionados dados ( $G_{mb}$  e  $G_{mm}$ ), obtiveram-se os Volume de Vazios ( $V_v$ ), Volume Betume-Vazios (VCB), Volume do Agregado Mineral (VAM) e a Relação Betume-Vazios (RBV), cujos resultados foram comparados aos relativos às diretrizes da Norma DNIT-ES 031/2004, que contém especificações para as Camada de Rolamento e Camada de Ligação (Tabela 3.3).

Parâmetros	Norma DNIT - ES 031/2004			
	Camada de Rolamento		Camada de Ligação	
	Min.	Máx.	Min.	Máx.
$V_v$ (%)	3	5	4	6
VCB (%)				

VAM (%)	15		15	
RBV (%)	75	82	65	72

**Tabela 3.3** - Especificação DNIT para misturas asfálticas

Fonte: DNIT, 2004.

Na obtenção da porcentagem ideal de substituição do pó de pedra pela cinza de termelétrica e a título exemplificativo, tendo em vista que o mesmo procedimento deve ser adotado para o biochar e o bióleo, elaborou-se um gráfico que mostra o comportamento do Volume de Vazios (Vv) relativo a porcentagem da troca do pó de pedra pela cinza. Estimou-se, assim, o máximo valor visando o limite da norma para o Vv alusivo a uma camada de rolamento de 5%.

Em seguida, confeccionaram-se novos corpos de prova considerando o resultado obtido anteriormente, sendo calculado o Vv, Volume Betume-Vazios (VCB), Volume do Agregado Mineral (VAM) e a Relação Betume-Vazios (RBV). Aferiram-se esses valores pelas especificações da norma DNIT-ES 031/2004, no sentido de ratificar a sua adequação ao revestimento proposto.

A cinza de termelétrica usada, como substituto parcial do pó de pedra ocorreu nas proporções de 2%, 4%, 6% e 8% para a realização do ensaio de compactação Marshall. Adquiriu-se tal material na usina termelétrica BK Energia. Se constitui em um resíduo proveniente do processo de produção de energia elétrica a partir da queima da madeira. É válido salientar que a empresa, estabelecida na cidade de Itacoatiara/AM/BR, faz uso de matéria-prima oriunda do manejo florestal, sendo certificada pela *Forest Stewardship Council* (FSC).

Desta forma e considerando o processo exemplificativo, bem como o fato do biochar também ser uma opção ao pó de pedra, adotou-se o mesmo percentual de substituição obtido com a cinza de termelétrica. Referindo-se ao CAP e ao bióleo proveniente da pirólise usando Placas de Circuito Impressas (PCI's), considerou-se 10% de acordo com valor máximo da pesquisa de Yang (2013) avaliando o desempenho de misturas asfálticas.

## 3.2 CUSTOS UNITÁRIOS DOS INSUMOS

### 3.2.1 Materiais convencionais

Os preços de mercado da Areia Média, Pó de Pedra, Brita n. 0, Brita n. 1 e do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) fundamentaram-se no Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI), gerenciado pela Caixa Econômica Federal, com a contribuição do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), responsável pela

atualização mensal dos valores dos insumos (SILVA, 2013). Ademais, também se consultaram o Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO), o qual é de responsabilidade do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Ressalta-se, notadamente, que a data base utilizada correspondeu a junho de 2020, pois era a mais atualizada durante a elaboração da pesquisa.

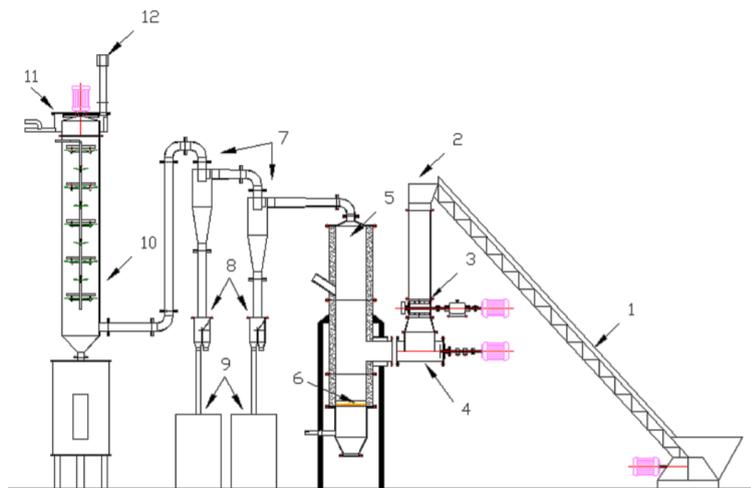
### 3.2.2 Materiais alternativos

#### 3.2.2.1 Cinza de termelétrica

Tendo em vista o fato de que a cinza de termelétrica é um resíduo da geração de energia elétrica, o custo considerado foi decorrente somente do transporte deste insumo da usina até o local de confecção da mistura asfáltica. Desta forma, obteve-se a distância entre a BK Energia, no Município de Itacoatiara/AM, e a cidade de Manaus/AM. Com base nesse resultado e na composição SINAPI 93590 (Transporte com Caminhão Basculante de 10 m<sup>3</sup>, em via urbana pavimentada, DMT acima de 30 km), foi possível o cálculo do dispêndio.

#### 3.2.2.2 Biochar e Bioóleo

No que diz respeito ao biochar e ao bio-óleo, considerou-se que a produção destes materiais ocorreu em uma planta de pirólise rápida com reator de leito fluidizado (Figura 3.3), a qual foi selecionada por se tratar do processo que apresenta melhor rendimento na recuperação de coprodutos (carvão e gás), baixo impacto ambiental e aplicabilidade do bio-óleo em escala industrial (PANNIRSELVAM et al., 2005).



**Figura 3.3** – Planta de pirólise rápida com reator de leito fluidizado  
**Fonte:** Pérez, 2006.

Destaca-se que, os principais componentes formadores de uma planta de pirólise são: esteira transportadora de biomassa (1), silo (2), dosador (3), rosca alimentadora (4), reator de leito fluidizado (5) com placa distribuidora de ar (6), dois ciclones em série para separar os finos (7), válvula amostradora (8) com tambores para armazenagem (9), sistema de recuperação de finos por via úmida (10), sistema de recuperação (11) e chaminé (12) (PÉREZ, 2006).

A escolha da matéria-prima energética, placa de circuito impresso, na realização da pirólise, levou em consideração questões técnicas, porquanto o selecionado material pode atuar como substituto parcial do ligante asfáltico (YANG,2013), bem como aspectos econômicos no sentido de que tivesse condições de atender à demanda da cidade de Manaus/AM, e, especialmente, avaliou-se que a sua utilização incorre em significativos benefícios, não somente para a construção de pavimentos, mas também ambientais, uma vez que a sua reciclagem representam uma importante solução a um passivo ambiental (YANG, 2013).

Específico aos gastos com o biochar e o bióleo, estes foram decorrentes das despesas inerentes à produção desses insumos, a qual seguiu a metodologia de Caibre (2013), para a produção de 1 tonelada do bioligante. Em complemento procedeu-se a soma do valor da coleta e transporte da matéria-prima (placas de circuito impresso) com os custos administrativos e gerais (contas de água, energia elétrica, telefone, materiais de escritório), mão de obra, manutenção e tributários.

### 3.3 CUSTO DE PRODUÇÃO DO CONCRETO ASFÁLTICO USINADO

#### 3.3.1 Materiais convencionais

Para a obtenção do preço da tonelada do concreto asfáltico tradicional elaborou-se uma composição de custo unitário apoiada na especificação 99080.3.9. da Secretaria Municipal de Infraestrutura (SEMINF), ou seja, usinagem do CA (CBUQ) com CAP 50/70, para capa de rolamento, que pode ser observada na Tabela 3.4. Selecionou-se esta formulação pois uma das empregadas nas obras de pavimentação realizadas pela Prefeitura Municipal de Manaus (PMM).

Código	Banco	Descrição	Und	Quant.
99080.3.9. SEMINF	Próprio	USINAGEM DE CBUQ COM CAP 50/70, PARA CAPA DE ROLAMENTO	T	1,0000000
88316	SINAPI	SERVENTE COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	0,1067000
5944	SINAPI	PÁ CARREGADEIRA SOBRE RODAS, POTÊNCIA 197 HP, CAPACIDADE DA CAÇAMBA 2,5 A 3,5 M3, PESO OPERACIONAL 18338 KG - CHP DIURNO. AF_06/2014	CHP	0,0035000
7030	SINAPI	TANQUE DE ASFALTO ESTACIONÁRIO COM SERPENTINA, CAPACIDADE 30.000 L - CHP DIURNO. AF_06/2014	CHP	0,0134000
93433	SINAPI	USINA DE MISTURA ASFÁLTICA À QUENTE, TIPO CONTRA FLUXO, PROD 40 A 80 TON/HORA - CHP DIURNO. AF_03/2016	CHP	0,0134000
00000370	SINAPI	AREIA MEDIA - POSTO JAZIDA/FORNECEDOR (RETIRADO NA JAZIDA, SEM TRANSPORTE)	m <sup>3</sup>	0,1610000
99076.2.3. SEMINF	Próprio	CAP 50/70	kg	60,0000000
00001379	SINAPI	CIMENTO PORTLAND COMPOSTO CP II-32	kg	28,0000000
00004720	SINAPI	PEDRA BRITADA N. 0, OU PEDRISCO (4,8 A 9,5 MM) POSTO PEDREIRA/FORNECEDOR, SEM FRETE	m <sup>3</sup>	0,3129000
00004721	SINAPI	PEDRA BRITADA N. 1 (9,5 a 19 MM) POSTO PEDREIRA/FORNECEDOR, SEM FRETE	m <sup>3</sup>	0,1341000

**Tabela 3.4** – Composição base para a obtenção do valor da tonelada do CA

Sublinha-se que se adaptou a composição 99080.3.9. SEMINF, aos insumos do item 3.2. À vista disso, o cimento portland, um dos componentes, foi substituído pelo pó de pedra utilizado na dosagem referência. Nessa conjuntura, usaram-se no cálculo dos coeficientes as massas específicas dos materiais que integram a formulação padrão (areia média, CAP 50/70, Pó de Pedra, Pedra Britada n. 0 e Pedra Britada n. 1) obtidas no item 3.2 do presente trabalho.

Em outra ação, adicionou-se o transporte dos insumos ao local de produção da mistura asfáltica. Nesse âmbito, inclui-se a composição auxiliar SINAPI Código 93590 (Transporte com caminhão basculante de 10 m<sup>3</sup>, em via urbana pavimentada, DMT acima de 30 km), cuja unidade é m<sup>3</sup> x km. Calculou-se essa quantidade com base na produção de 01 (uma) tonelada de CBUQ e na distância média das pedreiras e depósitos arenosos mais próximos a cidade de Manaus/AM.

### 3.3.2 Materiais alternativos

Adaptaram-se também duas outras composições, sendo uma com a substituição do CAP pelo bióleo em 10%, e a outra o pó de pedra pela cinza de termelétrica e o biochar na proporção encontrada no item 3.2. Igualmente incluiu-se o frete no valor final das formulações asfálticas alternativas.

### 3.4 COMPARAÇÃO E ANÁLISE ECONÔMICA EM TRÊS CENÁRIOS

O custo final das composições contendo os materiais alternativos, somada ao transporte, confrontou-se com a formulação padrão. Posteriormente, realizou-se um estudo de viabilidade econômica da instalação de plantas de pirólise relacionando os fluxos de caixa inerentes aos gastos com equipamentos e construção, custos de produção e receitas geradas.

Nesse contexto, foram analisados três cenários. O primeiro considerando a implantação de uma estrutura com condições de produzir 100 toneladas de bióleo por mês para atender a demanda de uma usina de mistura asfáltica. O segundo com capacidade para 500 t/mês, sendo que 20% seria destinado a utilização interna e 80% comercializados no sentido de servir outras usinas localizadas em Manaus/AM. No terceiro também considerou a implantação de uma planta para 500 t/mês, todavia 100% da geração seriam vendidas.

Destaca-se que foram analisados o fluxo financeiro do empreendimento no período de 10 anos, atendendo a vida útil dos equipamentos da Instrução Normativa RFB n. 1700, de 14 de março de 2017, da Secretaria da Receita Federal, onde consta o prazo para cada bem. Enfatiza-se que o cálculo da depreciação foi elaborado com o percentual de 10% ao ano, também consolidado na IN RFB n. 1700/2017.

Desta forma, relacionou-se a receita bruta para cada ano, deduziu-se os impostos e alíquotas e conseqüentemente obteve-se a quantia líquida anual. Em seguida, foi procedida a subtração dos custos de produção e o desabono, obtendo-se o lucro líquido tributável, e após a redução da contribuição social e do imposto de renda, determinou-se o ganho real do projeto.

Nesse contexto, de acordo com o investimento inicial, o tempo produtivo do empreendimento, bem como o rendimento, obteve-se o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o Payback. Fixou-se a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) de 6,50%, visto que se constitui no valor da taxa básica de juros da economia (SELIC), e que os títulos relacionados a esse índice são os mais seguros do mercado (REIS, 2019).

## CAPÍTULO 4

### 4 RESULTADOS

#### 4.1 DOSAGEM, MOLDAGEM E COMPACTAÇÃO

##### 4.1.1 Dosagem

A dosagem para a confecção dos corpos de prova cilíndricos de concreto asfáltico acompanhou a utilizada pela empresa Ardo Construtora e Pavimentação LTDA (Tabela 4.1), em vias da cidade de Manaus. Na obtenção dos parâmetros volumétricos dessa mistura referência participaram a areia, brita 0, brita 1, pó de pedra e asfalto.

<b>Brita 0</b>	<b>Brita 1</b>	<b>Pó de pedra</b>	<b>Areia média</b>	<b>CAP 50/70</b>
28,2%	14,8%	28,2%	23,8%	5%

**Tabela 4.1** – Dosagem da mistura referência.

A partir da composição asfáltica referência, calcularam-se as dosagens com vista à obtenção dos corpos de prova alusivos às formulações alternativas. Considerou-se na substituição do pó de pedra pela cinza de termelétrica as proporções de 2%, 4%, 6%, e 8% (CAMARGO, 2018). A temperatura usada igual a 165°C para a preparação desses compósitos, contendo ligante convencional, selecionou-se baseado em Singh (2015). Na Tabela 4.2 foi possível verificar as porcentagens de cada amostra. Na Tabela 4.3 pode ser observada as dosagens das formulações asfálticas considerando o biochar, como substituto do pó de pedra, nas similares porcentagens consideradas para a cinza de termelétrica, bem como do bio-óleo substituindo uma parcela do CAP convencional, fundamentado nas porcentagens de 4%, 6%, 8% e 10% de Yang (2013).

<b>Brita 0</b>	<b>Brita 1</b>	<b>Pó de pedra</b>	<b>Areia média</b>	<b>CAP 50/70</b>	<b>Cinza de termelétrica</b>
28,2%	14,8%	27,63%	23,8%	5%	0,57%
28,2%	14,8%	27,07%	23,8%	5%	1,13%
28,2%	14,8%	26,51%	23,8%	5%	1,69%
28,2%	14,8%	25,94%	23,8%	5%	2,26%

<b>Brita 0</b>	<b>Brita 1</b>	<b>Pó de pedra</b>	<b>Areia média</b>	<b>CAP 50/70</b>	<b>Biochar</b>
28,2%	14,8%	27,63%	23,8%	5%	0,57%
28,2%	14,8%	27,07%	23,8%	5%	1,13%
28,2%	14,8%	26,51%	23,8%	5%	1,69%
28,2%	14,8%	25,94%	23,8%	5%	2,26%

**Tabela 4.2** - Dosagem das misturas asfálticas com biochar.

<b>Brita 0</b>	<b>Brita 1</b>	<b>Pó de pedra</b>	<b>Areia média</b>	<b>CAP 50/70</b>	<b>Bio-óleo</b>
28,2%	14,8%	28,2%	23,8%	4,8%	0,2%
28,2%	14,8%	28,2%	23,8%	4,7%	0,3%
28,2%	14,8%	28,2%	23,8%	4,6%	0,4%
28,2%	14,8%	28,2%	23,8%	4,5%	0,5%

**Tabela 4.3** - Dosagem das misturas asfálticas com bio-óleo.

## 4.1.2 Moldagem e Compactação

### 4.1.2.1 Materiais referência

Efetuiu-se o processo de moldagem dos CP's com o compactador Marshall, sendo confeccionado 03 (três) corpos de prova (CP's), que podem ser observados na Figura 4.1. Também foi necessário a determinação da massa específica máxima medida (DMM ou Gmm) e da massa específica aparente da mistura compactada (Gmb), cujos valores constam na Tabela 4.4. Com base na ASTM D2041, o desvio padrão limite, alusivos aos citados parâmetros, é recomendado igual a 0,008. Desta forma, ocorreu o enquadramento segundo a citada norma, assim como pelos valores encontrados por Sholar (2010). Na sequência foram calculados os parâmetros volumétricos: Volume de Vazios (Vv), Vazios com Betume (VCB), Volume de Agregado Mineral (VAM) e Relação Betume Vazios (RBV), que podem ser visualizados na Tabela 4.5.



**Figura 4.1** - Corpos de prova da composição asfáltica referência.

Mistura de Referência					
Descrição	CP1	CP2	CP 3	$G_{mm}$ (médio)	Desvio Padrão
$G_{mm}$	2,465	2,471	2,474	2,47	0,005
$G_{mb}$	2,36	2,35	2,36	2,36	0,006

**Tabela 4.4** - Massa específica máxima medida e Massa específica aparente da mistura compactada – composição referência.

Parâmetros	Mistura Referência	Norma DNIT - ES 031/2004			
		Camada de Rolamento		Camada de Ligação	
		Min.	Máx.	Min.	Máx.
$V_v$ (%)	3,91	3	5	4	6
VCB (%)	7,66	-	-	-	-
VAM (%)	16,60	15	-	15	-
RBV (%)	76,44	75	82	65	72

**Tabela 4.5** - Parâmetros Volumétricos da mistura referência.

#### 4.1.2.2 Materiais alternativos

No processo de moldagem dos CP's usou-se também o compactador Marshall. Foram produzidas três amostras para cada porcentagem, em particular para o caso específico da substituição do pó de pedra pela cinza de termelétrica (2%, 4%, 6% e 8%). Os valores de massa específica máxima medida (DMM ou  $G_{mm}$ ) e da massa específica aparente da mistura compactada ( $G_{mb}$ ) podem ser verificados na Tabela 4.6.

<b>CT 01 - 2%</b>					
<b>Descrição</b>	<b>CP1</b>	<b>CP2</b>	<b>CP 3</b>	<b>G<sub>mm</sub> (médio)</b>	<b>Desvio Padrão</b>
<b>G<sub>mm</sub></b>	2,401	2,398	2,396	2,40	0,003
<b>G<sub>mb</sub></b>	2,29	2,28	2,28	2,28	0,006
<b>CT 02 – 4%</b>					
<b>Descrição</b>	<b>CP1</b>	<b>CP2</b>	<b>CP 3</b>	<b>G<sub>mm</sub> (médio)</b>	<b>Desvio Padrão</b>
<b>G<sub>mm</sub></b>	2,341	2,338	2,343	2,34	0,003
<b>G<sub>mb</sub></b>	2,21	2,22	2,205	2,21	0,008
<b>CT 03 – 6%</b>					
<b>Descrição</b>	<b>CP1</b>	<b>CP2</b>	<b>CP 3</b>	<b>G<sub>mm</sub> (médio)</b>	<b>Desvio Padrão</b>
<b>G<sub>mm</sub></b>	2,281	2,276	2,291	2,28	0,008
<b>G<sub>mb</sub></b>	2,145	2,14	2,14	2,14	0,003
<b>CT 04 – 8%</b>					
<b>Descrição</b>	<b>CP1</b>	<b>CP2</b>	<b>CP 3</b>	<b>G<sub>mm</sub> (médio)</b>	<b>Desvio Padrão</b>
<b>G<sub>mm</sub></b>	1,745	1,738	1,748	1,74	0,005
<b>G<sub>mb</sub></b>	1,61	1,6	1,61	1,61	0,006

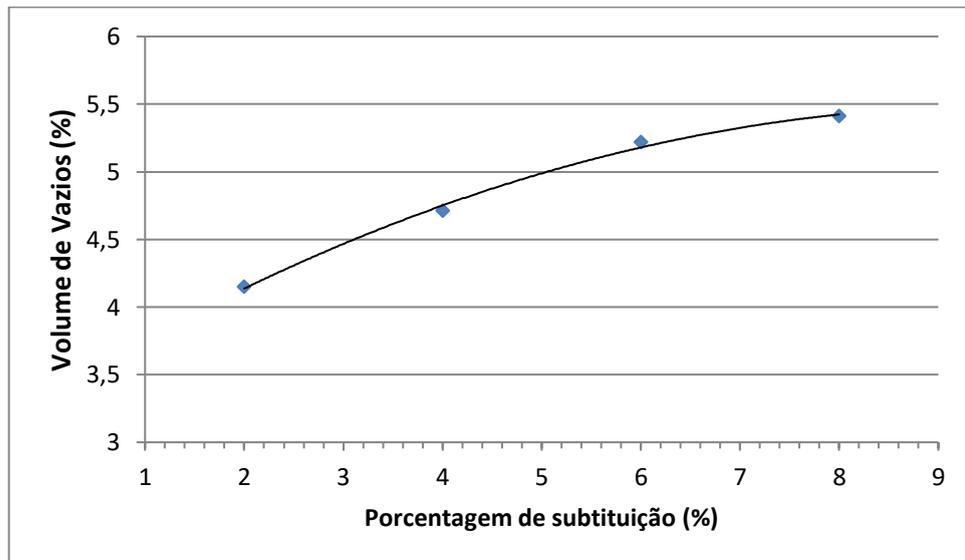
**Tabela 4.6** - Massa específica máxima medida (G<sub>mm</sub>) e massa específica aparente da mistura compactada (G<sub>mb</sub>) – composição com a cinza de termelétrica.

Com as informações anteriores, calcularam-se o Volume de Vazios ( $V_v$ ), Vazios com Betume (VCB), Volume de Agregado Mineral (VAM) e Relação Betume Vazios (RBV), que foram inseridos na Tabela 4.7. Consta-se que, os resultados atinentes à formulação contendo 6% e 8% de substituição do pó de pedra pelos resíduos de termelétrica mostram-se inadequados aos limites normativos, porquanto os valores do  $V_v$  iguais a 5,15% e 5,41%, respectivamente, ultrapassam o máximo da norma (5%) destinado a camada de rolamento.

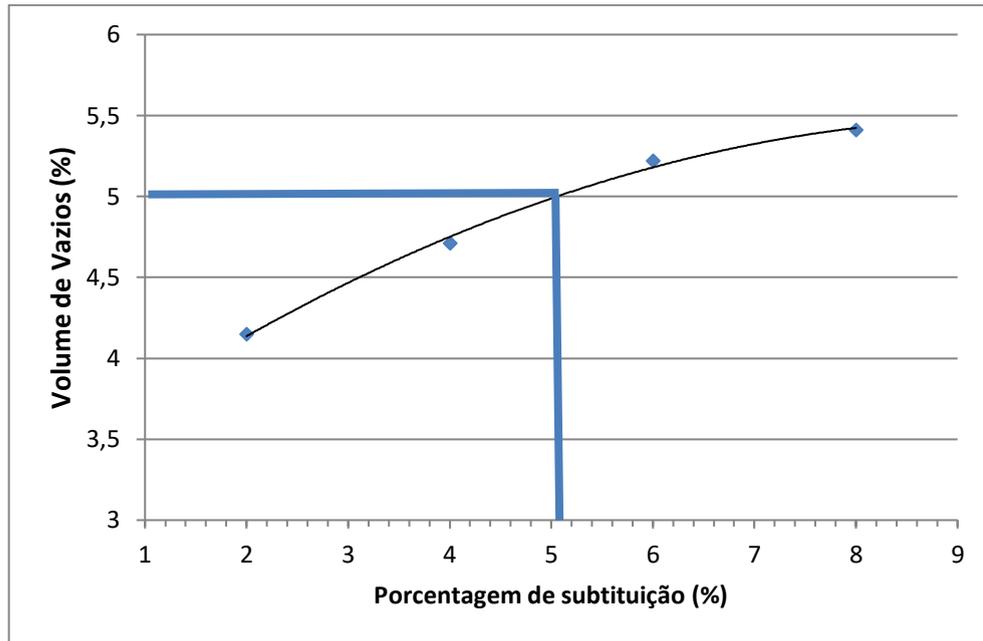
Parâmetros	CT 01 - 2%	CT 02 - 4%	CT 03 - 6%	CT 04 - 8%	Norma DNIT - ES 031/2004			
					Camada de Rolamento		Camada de Ligação	
					Min.	Máx.	Min.	Máx.
V <sub>v</sub> (%)	4,15	4,52	5,15	5,41	3	5	4	6
VCB (%)	7,75	7,84	7,95	8,78	-	-	-	-
VAM (%)	17,50	18,23	18,76	23,5	15	-	15	-
RBV (%)	76,28	76,15	76,02	75,50	75	82	65	72

**Tabela 4.7** - Parâmetros Volumétricos da mistura contendo cinza de termelétrica.

Em complemento, elaborou-se um gráfico (Gráfico 4.1) com o Volume de Vazios ( $V_v$ ) em ordenadas e a porcentagem de substituição do pó de pedra pela cinza de termelétrica em abcissas. No mencionado gráfico pode-se notar o comportamento crescente do  $V_v$  com o aumento do percentual de troca do material tradicional pelo alternativo. Deste modo, considerando-se o limite da norma do  $V_v$  para camada de rolamento igual a 5%, determinou-se o valor de 5,15% destinado às composições tendo a presença dos resíduos de termelétrica (Gráfico 4.2).



**Gráfico 4.1** – Volume de vazios x porcentagem de substituição do pó de pedra pela cinza de termelétrica.



**Gráfico 4.2** – Determinação da porcentagem máxima de substituição do pó de pedra pela cinza de termelétrica.

Assim, confeccionaram-se corpos de prova (CT 05) contendo a troca do pó de pedra pelos resíduos de termelétrica na proporção de 5,15%, cujos parâmetros concernentes aos parâmetros  $G_{mm}$  e  $G_{mb}$  podem ser visualizadas na Tabela 4.8. Ressalta-se que o valor do desvio padrão está de acordo com o estipulado pela norma ASTM D2041, assim como pelo estudo de Sholar (2010).

CT 05 – 5,15%					
Descrição	CP1	CP2	CP 3	$G_{mm}$ (médio)	Desvio Padrão
$G_{mm}$	2,013	2,010	2,015	2,01	0,003
$G_{mb}$	1,911	1,913	1,915	1,91	0,002

**Tabela 4.8** - Massa específica máxima medida ( $G_{mm}$ ) e aparente da mistura compactada ( $G_{mb}$ ), composição com 5,15% de substituição do pó de pedra pela cinza de termelétrica.

Embasado nos parâmetros da Tabela 4.8, determinou-se os parâmetros  $V_v$ , VCB, VAM e RBV, apresentados na Tabela 4.9. De acordo com a tabela mencionada, confirma-se que a formulação contendo 5,15% do material alternativo mostra-se adequada aos limites normativos para camada de rolamento, ou seja, o valor de  $V_v$  igual a 4,975% está no limite máximo normativo de 5%, assim como o VAM e o RBV, com resultados de 21,2% e 76,54%, posicionam-se, respectivamente, acima do mínimo (15%) para VAM e entre os limites do RBV

(75% e 82%).

Parâmetros	CT 05 – 5,15%	Norma DNIT - ES 031/2004			
		Camada de Rolamento		Camada de Ligação	
		Min.	Máx.	Min.	Máx.
V <sub>v</sub> (%)	4,975	3	5	4	6
VCB (%)	8,10	-	-	-	-
VAM (%)	21,2	15	-	15	-
RBV (%)	76,54	75	82	65	72

**Tabela 4.9** - Parâmetros Volumétricos da mistura asfáltica para 5,15% de substituição do pó de pedra pela cinza de termelétrica.

Quanto aos materiais provenientes da pirólise de resíduos de Placa de Circuito Impresso (PCIs), tem-se os outros dois participantes das formulações asfálticas estudadas. No caso do biochar, que também substituiu o pó de pedra, adotou-se para este outro material alternativo o mesmo valor anteriormente determinado igual a 5,15%. Para o bio-óleo e respaldado no trabalho de Yang (2013), considerou-se o percentual de substituição de 10% do CAP. Este valor foi o percentual máximo utilizado pelo referido autor, tendo verificado a sua viabilidade técnica como substituto do ligante asfáltico convencional. Salienta-se que o mesmo procedimento empregado na obtenção da porcentagem ideal de substituição da cinza de termelétrica pôde ser realizado para o bio-óleo e biochar.

## 4.2 AQUISIÇÃO DO PREÇO UNITÁRIO DOS INSUMOS

### 4.2.1 Materiais referência

Os preços dos insumos correspondentes à areia média, pó de pedra, Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), brita 0 e brita 1, obtiveram-se em conformidade com a tabela de preços do SINAPI para o Estado do Amazonas, com data base de junho de 2020 (Tabela 4.10). É válido citar que os referidos valores não consideram o transporte dos materiais.

Materiais	Unidade	Valor Unitário (R\$)
Areia Média	m <sup>3</sup>	75,00
Pó de Pedra	m <sup>3</sup>	89,12
CAP	T	2.658,96
Brita 0	m <sup>3</sup>	119,21
Brita 1	m <sup>3</sup>	93,36

**Tabela 4.10** – Valor unitário, segundo o SINAPI para o Amazonas, em junho de 2020.

## 4.2.2 Materiais alternativos

### 4.2.2.1 Cinza de termelétrica

O custo do resíduo decorreu essencialmente do transporte do material, ou seja, do local de obtenção, usina termelétrica BK Energia localizada no Município de Itacoatiara/AM, a cidade de Manaus/AM. Desta forma, para o cálculo considerou-se a distância de 240km e a composição SINAPI 93590 (Transporte com Caminhão Basculante de 10m<sup>3</sup>, em via urbana pavimentada, DMT acima de 30 km).

Além disso, obteve-se o coeficiente de 2,568 m<sup>3</sup> x km (metros cúbicos por quilômetro), o qual foi decorrente da substituição de 5,15% de cinza de termelétrica do quantitativo total de pó de pedra convencionalmente usado na produção de 01 tonelada de mistura asfáltica, no valor de 0,2075/m<sup>3</sup> (metros cúbicos), bem como a distância de 240 km (Equações 4.1 e 4.2). Portanto, levando em conta a composição SINAPI 93590 de R\$ 0,67/m<sup>3</sup> x km, calculou-se a monta de R\$ 1,72 (Equação 4.3).

$$0,2075 \text{ m}^3 \times 0,0515 = 0,0107 \text{ m}^3 \quad (4.1)$$

$$0,0107 \text{ m}^3 \times 240 \text{ km} = 2,568 \text{ m}^3 \times \text{km} \quad (4.2)$$

$$2,568 \times \text{R\$ } 0,67 = \text{R\$ } 1,72 \quad (4.3)$$

### 4.2.2.2 Bióleo e Biochar

Conforme Baldé et al (2015), em média, a população brasileira gera 7,1 kg/hab de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE) por ano. Desta forma, considerando que Manaus/AM possui 2.182.763 habitantes (IBGE, 2019), a capital do Amazonas origina anualmente 15.497,61t de REEE. Nesse sentido, contabilizando que são depositados no aterro sanitário da cidade 953.735,12 t/ano de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) (PMM, 2019), o percentual de REEE no RSU é de 1,62%.

Por outro lado, a planta de pirólise possui rendimento médio para a produção do bio-óleo de aproximadamente 75% (GONZÁLEZ et al, 2013), ou seja, seria necessário o valor de 1,33 toneladas de REEE para a geração de 1 tonelada desse material alternativo. Todavia, o custo da coleta de 1 tonelada de RSU em Manaus/AM é, em média, de R\$ 170,16 (PMM, 2018). Fazendo o dispêndio da matéria-prima para a pirólise ser de pelo menos R\$ 13.900,00, pois são necessárias cerca de 82 toneladas de RSU (1,33 de REEE) para cada tonelada de bio-óleo, o que o torna inviável economicamente.

Na capital do Amazonas está localizada a Zona Franca de Manaus (ZFM) que gera mais

de 215.000 toneladas ao ano de resíduos industriais (JICA, 2010) dos quais, pelo menos, 18.000 toneladas ao ano são constituídos por plástico polimerizado em processo, sendo que 50% são de PCIs sem os componentes, representando 9.000 toneladas ao ano (SUFRAMA,2012). Nesse contexto, tendo em conta que a usina de pirólise com capacidade de 500 toneladas por mês de bio-óleo, demanda 666,67 toneladas por mês (8.000 t/ano) de PCIs, há o suprimento da demanda de matéria-prima.

Isto posto, considerou-se que o custo da coleta e transporte da matéria-prima para a pirólise seria decorrente do dispêndio necessário para a realização deste serviço a partir das empresas da ZFM. Nessa conjuntura, realizou-se cotação de preço, em que se obteve o valor médio de R\$ 500,00 por tonelada.

Os gastos com a preparação das PCI's para a pirólise e dos insumos para o processo seguiu Carta el al (2012), o qual é de aproximadamente 6,5% do capital investido. Levando em conta o valor de R\$ 130.701,39 que corresponde ao investimento inicial para implantação de uma usina de pirólise com capacidade total de 54 toneladas (GONZÁLEZ et al, 2013), tem-se o custo unitário por tonelada igual a R\$ 157,33 (Equações 4.4 e 4.5).

$$R\$ 130.701,39 \times 0,065 = R\$ 8.495,59 \quad (4.4)$$

$$R\$ 8.495,59 / 54 t = R\$ 157,33 / t \quad (4.5)$$

Ademais, o recurso despendido da manutenção também acompanhou Carta el al (2012), representando 4,5%, ou seja, R\$ 108,92 por tonelada de bio-óleo (Equações 4.6 e 4.7). Nesse caso, o total relacionado a coleta e transporte, preparação da matéria-prima, insumos e manutenção totalizaram o valor de R\$ 766,25 por tonelada (Equação 4.8).

$$R\$ 130.701,39 \times 0,045 = R\$ 5.881,56 \quad (4.6)$$

$$R\$ 5.881,56 / 54 t = R\$ 108,92/t \quad (4.7)$$

$$R\$ 500,00/t + R\$ 157,33/t + R\$ 108,92/t = R\$ 766,25/t \quad (4.8)$$

Na Tabela 4.11 foi possível consultar a mão de obra necessária para a operação de uma planta de pirólise com capacidade para 47/t de bio-óleo por dia (CAIBRE, 2013), usada no presente trabalho, porquanto considera-se como a que melhor atende à demanda de operários para a produção a partir das PCI's. Os valores do salário mensal unitário atualizados obedeceram ao SINAPI, data-base 06/2020, referente ao Estado do Amazonas.

Código	Descrição	Unidade	Valor Unitário	Coefficiente	Valor Total
93567 SINAPI	ENGENHEIRO CIVIL DE OBRA PLENO COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	MES	17.722,14	1,0	17.722,14
88255 SINAPI	AUXILIAR TÉCNICO DE ENGENHARIA COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	29,86	1.080,0	32.248,80
100317 SINAPI	COORDENADOR / GERENTE DE OBRA COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	MES	22.655,95	1,0	22.655,95
88297 SINAPI	OPERADOR DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	30,18	3.780,0	114.080,40
90772 SINAPI	AUXILIAR DE ESCRITORIO COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	19,71	360,0	7.095,60
<b>VALOR MENSAL TOTAL</b>					<b>R\$ 193.802,89</b>

**Tabela 4.11** – Custo da mão-de-obra para a operação da planta de pirólise com capacidade para 47 toneladas por dia

**Fonte:** Adaptado de Caibre (2013).

Sendo assim, e considerando que a capacidade de produção total é de 1.034 toneladas por mês (22 dias úteis), o valor de mão de obra assume o valor de R\$ 187,43 por tonelada (Equação 4.9). Neste quantitativo estão inclusos os encargos sociais, como impostos e contribuições, que podem ser visualizados na Tabela 4.12. Logo, o custo de produção de uma tonelada de bio-óleo perfaz R\$ 953,68 (Equação 4.10).

COMPOSIÇÃO ANALÍTICA DAS TAXAS DE ENCARGOS SOCIAIS			
CÓDIGO	DESCRIÇÃO	HORISTA (%)	MENSALISTA (%)
<b>GRUPO A</b>			
A1	INSS	20,00	20,00
A2	SESI	1,50	1,50
A3	SENAI	1,00	1,00
A4	INCRA	0,20	0,20
A5	SEBRAE	0,60	0,60
A6	Salário Educação	2,50	2,50
A7	Seguro Contra Acidentes de Trabalho	3,00	3,00
A8	FGTS	8,00	8,00
A9	SECONCI	1,00	1,00
<b>A</b>	<b>Total:</b>	<b>37,80</b>	<b>37,80</b>
<b>GRUPO B</b>			
B1	Repouso Semanal Remunerado	17,95	0,00
B2	Feridos	4,01	0,00
B3	Auxílio - Enfermidade	0,89	0,69
B4	13º Salário	10,76	8,33
B5	Licença Paternidade	0,07	0,06
B6	Faltas Justificadas	0,72	0,56
B7	Dias de Chuvas	1,84	0,00

B8	Auxílio Acidente de Trabalho	0,11	0,09
B9	Férias Gozadas	14,29	11,07
B10	Salário Maternidade	0,03	0,03
<b>B</b>	<b>Total:</b>	<b>50,67</b>	<b>20,83</b>
<b>GRUPO C</b>			
C1	Aviso Prévio Indenizado	4,10	3,18
C2	Aviso Prévio Trabalhado	0,10	0,07
C3	Férias Indenizadas	0,00	0,00
C4	Depósito Rescisão Sem Justa Causa	3,60	2,79
C5	Indenização Adicional	0,35	0,27
<b>C</b>	<b>Total:</b>	<b>8,15</b>	<b>6,31</b>
<b>GRUPO D</b>			
D1	Reincidência de Grupo A sobre Grupo B	19,15	7,87
D2	Reincidência de Grupo A sobre Aviso Prévio Trabalhado e Reincidência do FGTS sobre Aviso Prévio Indenizado	0,37	0,28
<b>D</b>	<b>Total das Taxas incidências e reincidências</b>	<b>19,52</b>	<b>8,15</b>
<b>TOTAL(A+B+C+D) = TOTAL DE ENCARGOS SOCIAIS</b>		<b>116,14</b>	<b>73,09</b>

**Tabela 4.12** – Encargos sociais incidentes sobre o valor da mão-de-obra.

**Fonte:** Adaptado de SINAPI (2020).

$$R\$ 193.802,89 / 1034 t = R\$ 187,43 \quad (4.9)$$

$$R\$ 766,25/t + R\$ 187,43/t = 953,68/t \quad (4.10)$$

Específico ao biochar, tem-se que a usina de pirólise possui rendimento de 10% (GONZÁLEZ et al, 2013). Com isso, a produção de 0,1 tonelada desse material foi de R\$ 953,68, ou seja, com a massa específica de 0,45 g/cm<sup>3</sup> a 0,30 g/cm<sup>3</sup> (PASTOR-VILLEGAS et al., 2006) calculou-se o valor médio de 0,375 g/cm<sup>3</sup> (0,375 t/m<sup>3</sup>) e obteve-se que 1 (metro cúbico) m<sup>3</sup> de biochar custa R\$ 3.576,30 (Equações 4.11 e 4.12). Por conseguinte, este resultado foi de 4.012,90% maior que o valor de mercado do pó de pedra (R\$ 89,12), que se constitui no material a ser substituído.

$$R\$ 953,68 / 0,1t = R\$ 9.536,80/t \quad (4.11)$$

$$R\$ 9.536,80 \times 0,375 t/m^3 = R\$ 3.576,30 /m^3 \quad (4.12)$$

Porém, a produção de bio-óleo e de biochar ocorre de forma paralela, isto é, o segundo resíduo foi proveniente do primeiro, o que reduz o custo tão somente ao dispêndio necessário para a realização do seu transporte.

### 4.3 CUSTO DA PRODUÇÃO DO CONCRETO ASFÁLTICO USINADO

#### 4.3.1 Materiais referência

Elaborou-se uma composição destinada ao serviço de Usinagem do CBUQ para capa de rolamento, fundamentada na formulação 99080.3.9.SEMINF (Tabela 4.13). Participaram os seguintes materiais: Areia Média, Pedra Britada n. 0, Pedra Britada n. 1 e Pó de Pedra, e o CAP 50/70. A dosagem, conforme mencionado no item 4.1, acompanhou aquela usada pela Ardo Construtora e Pavimentação LTDA (Figura 4.4).

Código	Banco	Descrição	Und	Quant.	Valor Unit	Total
99080.3.9.SEMINF	Próprio	USINAGEM DE CBUQ COM CAP 50/70, PARA CAPA DE ROLAMENTO	T	1,0000000	324,23	324,23
88316	SINAPI	SERVENTE COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	0,1067000	16,37	1,74
5944	SINAPI	PÁ CARREGADEIRA SOBRE RODAS, POTÊNCIA 197 HP, CAPACIDADE DA CAÇAMBA 2,5 A 3,5 M3, PESO OPERACIONAL 18338 KG - CHP DIURNO. AF_06/2014	CHP	0,0035000	141,36	0,49
7030	SINAPI	TANQUE DE ASFALTO ESTACIONÁRIO COM SERPENTINA, CAPACIDADE 30.000 L - CHP DIURNO. AF_06/2014	CHP	0,0134000	124,08	1,66
93433	SINAPI	USINA DE MISTURA ASFÁLTICA À QUENTE, TIPO CONTRA FLUXO, PROD 40 A 80 TON/HORA - CHP DIURNO. AF_03/2016	CHP	0,0134000	1.810,69	24,26
00000370	SINAPI	AREIA MÉDIA - POSTO JAZIDA/FORNECEDOR (RETIRADO NA JAZIDA, SEM TRANSPORTE)	m <sup>3</sup>	0,1610000	75,00	12,07
99076.2.3.SEMINF	Próprio	CAP 50/70	Kg	60,0000000	3,60	216,00
00001379	SINAPI	CIMENTO PORTLAND COMPOSTO CP II-32	KG	28,0000000	0,65	18,20
00004720	SINAPI	PEDRA BRITADA N. 0, OU PEDRISCO (4,8 A 9,5 MM) POSTO PEDREIRA/FORNECEDOR, SEM FRETE	m <sup>3</sup>	0,3129000	119,21	37,30
00004721	SINAPI	PEDRA BRITADA N. 1 (9,5 a 19 MM) POSTO PEDREIRA/FORNECEDOR, SEM FRETE	m <sup>3</sup>	0,1341000	93,36	12,51
				Valor com BDI =>		324,23

**Tabela 4.13** - Composição do Custo Unitário (CCU) de referência.

**Fonte:** SEMINF, 2020.



**Figura 4.2** – Quantidade de materiais considerando a dosagem referência.

Efetivou-se a adaptação dos coeficientes por meio da conversão de unidades (Figura 4.3) de quilograma para aquela presente na referência, e em conformidade com a produção de 01 tonelada de CBUQ. À vista disso, no caso da Brita 0, Brita 1, Pó de Pedra e Areia, dividiu-se o peso de cada material, pela respectiva massa específica, tendo-se resultados em  $m^3$  (metros cúbicos). Para o CAP modificou-se o valor para toneladas por meio do fator 1000 kg/t (quilograma por tonelada). Tal procedimento pode ser observado pelas Equações 4.13, 4.14, 4.15, 4.16 e 4.17, que resultou na formulação adaptada (99080.3.9.SEMINF – ADAPTADO), registrado na Tabela 4.14.

$$\text{Brita 0} = \frac{282 \text{ kg}}{1.526 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,1847 \text{ m}^3 \quad (4.13)$$

$$\text{Brita 1} = \frac{148 \text{ kg}}{1.524 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,0971 \text{ m}^3 \quad (4.14)$$

$$\text{Pó de Pedra} = \frac{282 \text{ kg}}{1.359 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,2075 \text{ m}^3 \quad (4.15)$$

$$\text{Areia} = \frac{238 \text{ kg}}{1.327 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,1793 \text{ m}^3 \quad (4.16)$$

$$\text{CAP} = \frac{50 \text{ kg}}{1.000 \text{ kg}} = 0,05 \text{ toneladas} \quad (4.17)$$

Código	Banco	Descrição	Und	Quant.	Valor Unit	Total
99080.3.9.SEMINF - ADAPTADO	Próprio	USINAGEM DE CBUQ COM CAP 50/70, PARA CAPA DE ROLAMENTO	T	1,0000000	224,09	224,09
88316	SINAPI	SERVENTE COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	0,1067000	16,37	1,74
5944	SINAPI	PÁ CARREGADEIRA SOBRE RODAS, POTÊNCIA 197 HP, CAPACIDADE DA CAÇAMBA 2,5 A 3,5 M3, PESO OPERACIONAL 18338 KG - CHP DIURNO. AF_06/2014	CHP	0,0035000	141,36	0,49
7030	SINAPI	TANQUE DE ASFALTO ESTACIONÁRIO COM SERPENTINA, CAPACIDADE 30.000 L - CHP DIURNO. AF_06/2014	CHP	0,0134000	124,08	1,66
93433	SINAPI	USINA DE MISTURA ASFÁLTICA À QUENTE, TIPO CONTRA FLUXO, PROD 40 A 80 TON/HORA - CHP DIURNO. AF_03/2016	CHP	0,0134000	1.810,69	24,26
00000370	SINAPI	AREIA MEDIA - POSTO JAZIDA/FORNECEDOR (RETIRADO NA JAZIDA, SEM TRANSPORTE)	m³	0,1793000	75,00	13,44
00004720	SINAPI	PEDRA BRITADA N. 0, OU PEDRISCO (4,8 A 9,5 MM) POSTO PEDREIRA/FORNECEDOR, SEM FRETE	m³	0,1847000	119,21	22,01
00004721	SINAPI	PEDRA BRITADA N. 1 (9,5 a 19 MM) POSTO PEDREIRA/FORNECEDOR, SEM FRETE	m³	0,0971000	93,36	9,06
00004741	SINAPI	PO DE PEDRA (POSTO PEDREIRA/FORNECEDOR, SEM FRETE)	m³	0,2075000	89,12	18,49
00041899	SINAPI	CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO A GRANEL (CAP) 50/70 (COLETADO CAIXA NA ANP ACRESCIDO DE ICMS)	T	0,0500000	2.658,96	132,94
					Valor com BDI =>	224,09

**Tabela 4.14** – Composição do Custo Unitário (CCU) adaptada aos materiais referência e respectivos coeficientes.

Posteriormente, adicionou-se o consumo financeiro do transporte dos insumos ao local de produção da mistura asfáltica, por meio das composições auxiliares constantes no SINAPI 93590 e SINAPI 93177, referente aos agregados e ao Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP 50/70), respectivamente. Os cálculos referentes ao SINAPI 93590 (Transporte com caminhão basculante de 10 m³, em via urbana pavimentada, DMT acima de 30 km), respaldou-se na distância média das pedreiras e depósitos arenosos mais próximos a Manaus/AM (Tabela 4.15).

Materiais	Distância Média
Pó de Pedra	135 km
Brita 0	135 km
Brita 1	135 km

Areia	30 km
CAP50/70	15 km

**Tabela 4.15** – Distância média dos locais de aquisição dos materiais a região central de Manaus/AM.

Inicialmente, somaram-se os coeficientes atinentes aos materiais cuja aquisição pôde ser realizada a 135 km, dentre os quais, pó de pedra, brita 0 e brita 1, chegando ao valor de 0,4893. Em seguida, multiplicou-se pela distância, resultando  $66,0555 \text{ m}^3 \times \text{km}$  (metros cúbicos por quilômetro) (Equações 4.18 e 4.19). No caso da areia, cujo índice foi igual a 0,1793, houve diretamente a multiplicação por 30 km obtendo-se 5,379 (Equação 4.20 e 4.21). Ao final, somaram-se resultados (66,0555 e 5,379), sendo possível determinar o valor de  $71,434 \text{ m}^3 \times \text{km}$  (metros cúbicos por quilômetro), o qual se refere ao quantitativo da composição 93590 (Equação 4.22).

$$\begin{aligned} \text{Soma coef. mat. dist. média } 135 \text{ km} &= 0,1847 \text{ m}^3 + 0,0971 \text{ m}^3 + 0,2075 \text{ m}^3 & (4.18) \\ &= 0,4893 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Coef. m}^3 \times \text{km} - 135 \text{ km} = 0,4893 \text{ m}^3 \times 135 \text{ km} = 66,0555 \text{ m}^3 \times \text{km} \quad (4.19)$$

$$\text{Coef. mat. dist. média } 30 \text{ km} = 0,1793 \quad (4.20)$$

$$\text{Coef. m}^3 \times \text{km} - 30 \text{ km} = 0,1793 \times 30 = 5,379 \quad (4.21)$$

$$\text{Coef. m}^3 \times \text{km a ser inserido na composição } 93590 = 66,0555 + 5,379 = 71,434 \quad (4.22)$$

Notou-se, também, por intermédio das Equações 4.23 e 4.24 a determinação pelo SINAPI 93177 (Transporte de material asfáltico, com caminhão com capacidade de 2000 L em rodovia pavimentada para distâncias médias de transporte igual ou inferior a 100 km). Nesta situação, multiplicou-se o coeficiente 0,05 do CAP pela distância de 15 km encontrando-se o valor  $0,75 \text{ m}^3 \times \text{km}$ . A Tabela 4.16 expõe a formulação adaptada. Quantificando-se que a produção de 1 tonelada de CBUQ somada ao transporte dos insumos até a usina de mistura asfáltica, resultou em R\$ 273,18. Este valor indicou que houve o acréscimo de 21,91% àquele evidenciado na Tabela 4.14.

$$\text{Coef. mat. dist. média 15 km} = 0,05 \quad (4.23)$$

$$\text{Coef. T x km a ser inserido na composição 93177} = 0,05 \times 15 = 0,75 \quad (4.24)$$

Código	Banco	Descrição	Und	Quant.	Valor Unit	Total
99080.3.9.SEMINF - ADAPTADO - TRANSP.	Próprio	USINAGEM DE CBUQ COM CAP 50/70, PARA CAPA DE ROLAMENTO - COM TRANSPORTE DE INSUMOS	T	1,0000000	273,18	273,18
88316	SINAPI	SERVENTE COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	0,1067000	16,37	1,74
5944	SINAPI	PÁ CARREGADEIRA SOBRE RODAS, POTÊNCIA 197 HP, CAPACIDADE DA CAÇAMBA 2,5 A 3,5 M3, PESO OPERACIONAL 18338 KG - CHP DIURNO. AF_06/2014	CHP	0,0035000	141,36	0,49
7030	SINAPI	TANQUE DE ASFALTO ESTACIONÁRIO COM SERPENTINA, CAPACIDADE 30.000 L - CHP DIURNO. AF_06/2014	CHP	0,0134000	124,08	1,66
93433	SINAPI	USINA DE MISTURA ASFÁLTICA À QUENTE, TIPO CONTRA FLUXO, PROD 40 A 80 TON/HORA - CHP DIURNO. AF_03/2016	CHP	0,0134000	1.810,69	24,26
93590	SINAPI	TRANSPORTE COM CAMINHÃO BASCULANTE DE 10 M3, EM VIA URBANA PAVIMENTADA, DMT ACIMA DE 30KM (UNIDADE: M3XKM). AF_04/2016	M3Xk m	71,434000 0	0,67	47,86
93177	SINAPI	TRANSPORTE DE MATERIAL ASFALTICO, COM CAMINHÃO COM CAPACIDADE DE 20000 L EM RODOVIA PAVIMENTADA PARA DISTÂNCIAS MÉDIAS DE TRANSPORTE IGUAL OU INFERIOR A 100 KM. AF_02/2016	TXKM	0,7500000	1,65	1,23
0000370	SINAPI	AREIA MEDIA - POSTO JAZIDA/FORNECEDOR (RETIRADO NA JAZIDA, SEM TRANSPORTE)	m³	0,1793000	75,00	13,44
00004720	SINAPI	PEDRA BRITADA N. 0, OU PEDRISCO (4,8 A 9,5 MM) POSTO PEDREIRA/FORNECEDOR, SEM FRETE	m³	0,1847000	119,21	22,01
00004721	SINAPI	PEDRA BRITADA N. 1 (9,5 a 19 MM) POSTO PEDREIRA/FORNECEDOR, SEM FRETE	m³	0,0971000	93,36	9,06
00004741	SINAPI	PO DE PEDRA (POSTO PEDREIRA/FORNECEDOR, SEM FRETE)	m³	0,2075000	89,12	18,49
00041899	SINAPI	CIMENTO ASFALTICO DE PETROLEO A GRANEL (CAP)	T	0,0500000	2.658,96	132,94

		50/70 (COLETADO CAIXA NA ANP ACRESCIDO DE ICMS)				
				Valor com BDI =>		273,18

**Tabela 4.16** - Composição do Custo Unitário (CCU) para o transporte dos insumos até o local de produção da mistura asfáltica.

#### 4.3.2 Cinza de Termelétrica

Visando a comparação com o valor do CBUQ contendo o material alternativo cinza de termelétrica como substituto parcial (5,15%) do Pó de Pedra, a composição própria supramencionada foi novamente modificada. Nesse caso, somaram-se os coeficientes dos insumos da formulação tradicional, porém com a alteração da quantidade de pó de pedra para 0,1968 m<sup>3</sup> (Equações 4.25, 4.26, 4.27 e 4.28). A diferença na ordem de 0,01068m<sup>3</sup> (metros cúbicos por quilômetro) foi multiplicada por 240 km, que correspondeu à distância entre o local de aquisição da cinza de termelétrica e à cidade de Manaus/AM (Equações 4.29 e 4.30). Posteriormente, procedeu-se a soma, encontrando o valor 72,5547m<sup>3</sup> x km (Equação 31) referentes a nova quantidade do serviço SINAPI 93590. O valor final do CBUQ com resíduo de termelétrica foi de R\$ 272,97, tal como pode ser verificado na Tabela 4.17.

$$\begin{aligned} \text{Soma coef. mat. dist. média } 135 \text{ km} &= 0,1847 \text{ m}^3 + 0,0971 \text{ m}^3 + 0,1968 \text{ m}^3 \quad (4.25) \\ &= 0,4786 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Coef. m}^3 \times \text{km} - 135 \text{ km} = 0,4786 \text{ m}^3 \times 135 \text{ km} = 64,611 \text{ m}^3 \times \text{km} \quad (4.26)$$

$$\text{Coef. mat. dist. média } 30 \text{ km} = 0,1793 \quad (4.27)$$

$$\text{Coef. m}^3 \times \text{km} - 30 \text{ km} = 0,1793 \times 30 = 5,379 \quad (4.28)$$

$$\text{Coef. mat. dist. média } 240 \text{ km} = 0,01068 \quad (4.29)$$

$$\text{Coef. m}^3 \times \text{km} - 240 \text{ km} = 0,01068 \times 240 = 2,5647 \quad (4.30)$$

$$\text{Coef. m}^3 \times \text{km a ser inserido na composição } 93590 = 64,611 + 5,379 + 2,5647 = 72,5547 \quad (4.31)$$

Código	Banco	Descrição	Und	Quant.	Valor Unit	Total
99080.3.9.SEMINF - ADAPTADO - CINZA DE TERME	Próprio	USINAGEM DE CBUQ COM CAP 50/70 E CINZA DE TERMELÉTRICA, PARA CAPA DE ROLAMENTO - COM TRANSPORTE DE INSUMOS	T	1,0000000	272,97	272,97
88316	SINAPI	SERVENTE COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	0,1067000	16,37	1,74
5944	SINAPI	PÁ CARREGADEIRA SOBRE RODAS, POTÊNCIA 197 HP, CAPACIDADE DA CAÇAMBA 2,5 A 3,5 M3, PESO OPERACIONAL 18338 KG - CHP DIURNO. AF_06/2014	CHP	0,0035000	141,36	0,49
7030	SINAPI	TANQUE DE ASFALTO ESTACIONÁRIO COM SERPENTINA, CAPACIDADE 30.000 L - CHP DIURNO. AF_06/2014	CHP	0,0134000	124,08	1,66
93433	SINAPI	USINA DE MISTURA ASFÁLTICA À QUENTE, TIPO CONTRA FLUXO, PROD 40 A 80 TON/HORA - CHP DIURNO. AF_03/2016	CHP	0,0134000	1.810,69	24,26
93590	SINAPI	TRANSPORTE COM CAMINHÃO BASCULANTE DE 10 M3, EM VIA URBANA PAVIMENTADA, DMT ACIMA DE 30KM (UNIDADE: M3XKM). AF_04/2016	M3XKM	72,554700	0,67	48,61
93177	SINAPI	TRANSPORTE DE MATERIAL ASFALTICO, COM CAMINHÃO COM CAPACIDADE DE 20000 L EM RODOVIA PAVIMENTADA PARA DISTÂNCIAS MÉDIAS DE TRANSPORTE IGUAL OU INFERIOR A 100 KM. AF_02/2016	TXKM	0,7500000	1,65	1,23
00000370	SINAPI	AREIA MEDIA - POSTO JAZIDA/FORNECEDOR (RETIRADO NA JAZIDA, SEM TRANSPORTE)	m³	0,1793000	75,00	13,44
00004720	SINAPI	PEDRA BRITADA N. 0, OU PEDRISCO (4,8 A 9,5 MM) POSTO PEDREIRA/FORNECEDOR, SEM FRETE	m³	0,1847000	119,21	22,01
00004721	SINAPI	PEDRA BRITADA N. 1 (9,5 a 19 MM) POSTO PEDREIRA/FORNECEDOR, SEM FRETE	m³	0,0971000	93,36	9,06
00004741	SINAPI	PO DE PEDRA (POSTO PEDREIRA/FORNECEDOR, SEM FRETE)	m³	0,1968000	89,12	17,53
00041899	SINAPI	CIMENTO ASFALTICO DE PETROLEO A GRANEL (CAP) 50/70 (COLETADO CAIXA NA ANP ACRESCIDO DE ICMS)	T	0,0500000	2.658,96	132,94
			LS =>	5,11	MO com LS =>	9,51
				Valor com BDI =>		272,97

**Tabela 4.17** – Composição do Custo Unitário (CCU) considerando o insumo alternativo cinza de termelétrica.

### 4.3.3 Biochar e bio-óleo

Na participação do bio-óleo como substituto de 10% do CAP, procedeu-se a uma nova adaptação (Tabela 4.18). Neste item, os quantitativos exibidos no SINAPI 93590 e 93177 foram os mesmos da formulação tradicional (Tabela 4.19), pois as distâncias médias de transporte dos insumos consideraram-se as mesmas, resultando no valor final de R\$ 264,65.

Código	Banco	Descrição	Und	Quant.	Valor Unit	Total
99080.3.9.SEMINF - ADAPTADO - BIOLEO	Próprio	USINAGEM DE CBUQ COM CAP 50/70, PARA CAPA DE ROLAMENTO - COM TRANSPORTE DE INSUMOS – BIOÓLEO	T	1,0000000	264,65	264,65
88316	SINAPI	SERVENTE COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	0,1067000	16,37	1,74
5944	SINAPI	PÁ CARREGADEIRA SOBRE RODAS, POTÊNCIA 197 HP, CAPACIDADE DA CAÇAMBA 2,5 A 3,5 M3, PESO OPERACIONAL 18338 KG - CHP DIURNO. AF_06/2014	CHP	0,0035000	141,36	0,49
7030	SINAPI	TANQUE DE ASFALTO ESTACIONÁRIO COM SERPENTINA, CAPACIDADE 30.000 L - CHP DIURNO. AF_06/2014	CHP	0,0134000	124,08	1,66
93433	SINAPI	USINA DE MISTURA ASFÁLTICA À QUENTE, TIPO CONTRA FLUXO, PROD 40 A 80 TON/HORA - CHP DIURNO. AF_03/2016	CHP	0,0134000	1.810,69	24,26
93590	SINAPI	TRANSPORTE COM CAMINHÃO BASCULANTE DE 10 M3, EM VIA URBANA PAVIMENTADA, DMT ACIMA DE 30KM (UNIDADE: M3XKM). AF_04/2016	M3X KM	71,4340000	0,67	47,86
93177	SINAPI	TRANSPORTE DE MATERIAL ASFALTICO, COM CAMINHÃO COM CAPACIDADE DE 20000 L EM RODOVIA PAVIMENTADA PARA DISTÂNCIAS MÉDIAS DE TRANSPORTE IGUAL OU INFERIOR A 100 KM. AF_02/2016	TXK M	0,7500000	1,65	1,23
00000370	SINAPI	AREIA MEDIA - POSTO JAZIDA/FORNECEDOR (RETIRADO NA JAZIDA, SEM TRANSPORTE)	m³	0,1793000	75,00	13,44
00004720	SINAPI	PEDRA BRITADA N. 0, OU PEDRISCO (4,8 A 9,5 MM) POSTO PEDREIRA/FORNECEDOR, SEM FRETE	m³	0,1847000	119,21	22,01
00004721	SINAPI	PEDRA BRITADA N. 1 (9,5 a 19 MM) POSTO PEDREIRA/FORNECEDOR, SEM FRETE	m³	0,0971000	93,36	9,06

00004741	SINAPI	PO DE PEDRA (POSTO PEDREIRA/FORNECEDOR, SEM FRETE)	m <sup>3</sup>	0,2075000	89,12	18,49
00041899	SINAPI	CIMENTO ASFALTICO DE PETROLEO A GRANEL (CAP) 50/70 (COLETADO CAIXA NA ANP ACRESCIDO DE ICMS)	T	0,0450000	2.658,96	119,65
INSUMO - BIOLEO	Próprio	BIOLEO OBTIDO A PARTIR DE PLACAS DE CIRCUITO INTEGRADO	T	0,0050000	953,68	4,76
					Valor com BDI =>	264,65

**Tabela 4.18** – Composição de Custo Unitário (CCU) considerando o insumo alternativo Bio-óleo.

Além disso, atentando que o biochar é um resíduo do bio-óleo e o percentual de 5,15% de substituição, os benefícios econômicos são maximizados. Nota-se que, o quantitativo presente no SINAPI 93590 obteve-se consoante ao mesmo procedimento do item 4.3.2 (Equações 4.32, 4.33, 4.34 e 4.35), porém com a distância média para o biochar de 15 km (Equações 4.36 e 4.37). Isso devido, tanto a planta de pirólise quanto a usina de mistura asfáltica estarem localizadas em Manaus/AM, assim, o valor total foi de 70,1502 (Equação 4.38). Nesse caso, o custo da mistura asfáltica alcançou o valor de R\$ 262,83 por tonelada (Tabela 4.19).

$$\begin{aligned} \text{Soma coef. mat. dist. média } 135 \text{ km} &= 0,1847 \text{ m}^3 + 0,0971 \text{ m}^3 + 0,1968 \text{ m}^3 \quad (4.32) \\ &= 0,4786 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Coef. m}^3 \times \text{km} - 135 \text{ km} = 0,4786 \text{ m}^3 \times 135 \text{ km} = 64,611 \text{ m}^3 \lambda \quad (4.33)$$

$$\text{Coef. areia. dist. média } 30 \text{ km} = 0,1793 \quad (4.34)$$

$$\text{Coef. m}^3 \times \text{km} - 30 \text{ km} = 0,1793 \times 30 = 5,379 \quad (4.35)$$

$$\text{Coef. biochar. dist. média } 15 \text{ km} = 0,01068 \quad (4.36)$$

$$\text{Coef. m}^3 \times \text{km} - 15 \text{ km} = 0,01068 \times 15 = 0,1602 \quad (4.37)$$

$$\text{Coef. m}^3 \times \text{km a ser inserido na composição } 93590 = 64,611 + 5,379 + 0,1602 = 70,1502 \quad (4.38)$$

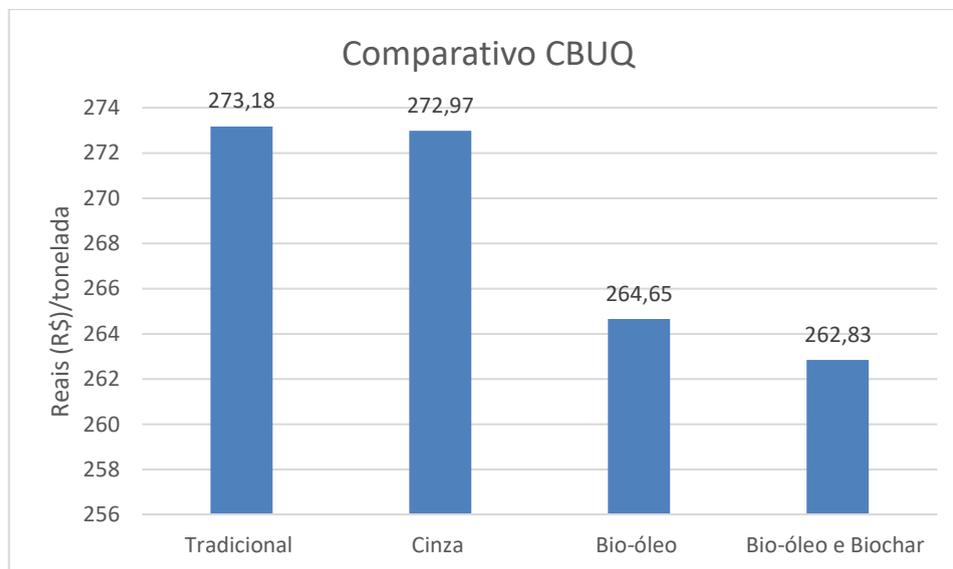
Código	Banco	Descrição	Und	Quant.	Valor Unit	Total
99080.3.9. SEMINF - ADAPTADO - BIO-ÓLEO E BIOCHAR	Próprio	USINAGEM DE CBUQ COM CAP 50/70, PARA CAPA DE ROLAMENTO - COM TRANSPORTE DE INSUMOS - BIOÓLEO E BIOCHAR	T	1,0000000	262,83	262,83
88316	SINAPI	SERVENTE COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	0,1067000	16,37	1,74
5944	SINAPI	PÁ CARREGADEIRA SOBRE RODAS, POTÊNCIA 197 HP, CAPACIDADE DA CAÇAMBA 2,5 A 3,5 M3, PESO OPERACIONAL 18338 KG - CHP DIURNO. AF_06/2014	CHP	0,0035000	141,36	0,49
7030	SINAPI	TANQUE DE ASFALTO ESTACIONÁRIO COM SERPENTINA, CAPACIDADE 30.000 L - CHP DIURNO. AF_06/2014	CHP	0,0134000	124,08	1,66
93433	SINAPI	USINA DE MISTURA ASFÁLTICA À QUENTE, TIPO CONTRA FLUXO, PROD 40 A 80 TON/HORA - CHP DIURNO. AF_03/2016	CHP	0,0134000	1.810,69	24,26
93590	SINAPI	TRANSPORTE COM CAMINHÃO BASCULANTE DE 10 M3, EM VIA URBANA PAVIMENTADA, DMT ACIMA DE 30KM (UNIDADE: M3XKM). AF_04/2016	M3XKM	70,1502000	0,67	47,00
93177	SINAPI	TRANSPORTE DE MATERIAL ASFÁLTICO, COM CAMINHÃO COM CAPACIDADE DE 20000 L EM RODOVIA PAVIMENTADA PARA DISTÂNCIAS MÉDIAS DE TRANSPORTE IGUAL OU INFERIOR A 100 KM. AF_02/2016	TXKM	0,7500000	1,65	1,23
00000370	SINAPI	AREIA MEDIA - POSTO JAZIDA/FORNECEDOR (RETIRADO NA JAZIDA, SEM TRANSPORTE)	m³	0,1793000	75,00	13,44
00004720	SINAPI	PEDRA BRITADA N. 0, OU PEDRISCO (4,8 A 9,5 MM) POSTO PEDREIRA/FORNECEDOR, SEM FRETE	m³	0,1847000	119,21	22,01
00004721	SINAPI	PEDRA BRITADA N. 1 (9,5 a 19 MM) POSTO PEDREIRA/FORNECEDOR, SEM FRETE	m³	0,0971000	93,36	9,06
00004741	SINAPI	PO DE PEDRA (POSTO PEDREIRA/FORNECEDOR, SEM FRETE)	m³	0,1968000	89,12	17,53
00041899	SINAPI	CIMENTO ASFÁLTICO DE PETROLEO A GRANEL (CAP) 50/70 (COLETADO CAIXA NA ANP ACRESCIDO DE ICMS)	T	0,0450000	2.658,96	119,65
INSUMO - BIOLEO	Próprio	BIOLEO OBTIDO A PARTIR DE PLACAS DE CIRCUITO INTEGRADO	T	0,0050000	953,68	4,76
					Valor com BDI =>	262,83

**Tabela 4.19** – Composição do Custo Unitário (CCU) par o Bio-óleo e Biochar

#### 4.4 COMPARAÇÃO E ANÁLISE ECONÔMICA EM TRÊS CENÁRIOS

No Gráfico 4.3 visualiza-se o valor do Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) da mistura asfáltica tradicional (R\$ 273,18), bem como da composição contendo os insumos alternativos cinza de termelétrica (R\$ 272,97), bio-óleo (R\$ 264,65), e este material juntamente

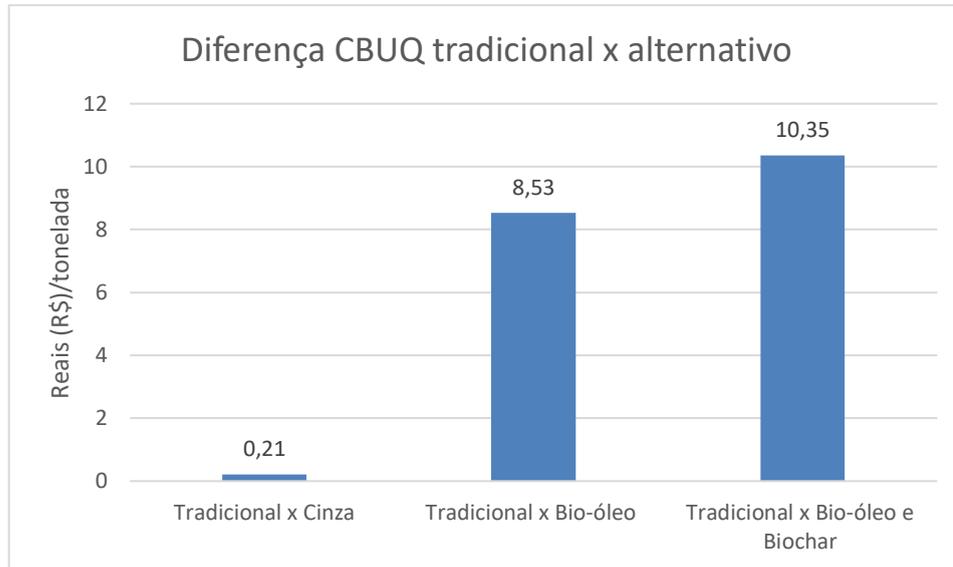
com o biochar (R\$ 262,83).



**Gráfico 4.3** – Comparativo entre os valores da mistura asfáltica tradicional e as alternativas.

Verificou-se uma economia de R\$ 0,21 por tonelada de usinagem de CBUQ com CAP 50/70, com a cinza de termelétrica como substituta parcial (5,15%) do pó de pedra, representando uma redução de 0,077% por tonelada. Todavia, quanto mais próxima a distância da usina e quanto maior for a porcentagem ocorre a maximização dos benefícios.

Inerente a permuta de 10% do CAP convencional pelo bio-óleo, resultou o quantitativo de R\$ 8,53 por tonelada, correspondendo a 3,12%. É importante citar que ao adicionar o biochar como substituto parcial (5,15%) do pó de pedra, o dispêndio fica em R\$ 262,83. Por conseguinte, implica em uma contração de R\$ 10,35 por tonelada, isto é, 3,79% relativo à mistura contendo os materiais convencionalmente utilizados. No Gráfico 4.4 observa-se um comparativo da diferença entre o valor da mistura asfáltica tradicional e aquela contendo os insumos alternativos.



**Gráfico 4.4** – Comparativo entre a diferença no valor da formulação referência e as alternativas.

#### 4.4.1 Primeiro Cenário

Caibre (2013) diz que o investimento inicial para a implantação de uma planta de pirólise com capacidade para 620 kg/h (quilograma por hora, equivalente a 446,4 toneladas por mês) é de U\$\$ 1.000.000,00. Nele estão inclusos o custo com equipamentos, terreno, projetos de engenharia e licenças ambientais, construção civil e unidade de segregação de resíduos.

No primeiro cenário adotou-se a estrutura de 100 toneladas de bio-óleo por mês no sentido de atender a uma única usina de mistura asfáltica, assim, a aplicação inaugural foi da ordem de U\$\$ 224.014,34. Logo, com a taxa cambial de R\$ 5,20 (média do valor de julho/2020 segundo o Banco Central do Brasil) o valor fica em R\$ 1.164.874,57, conforme demonstrado nas Equações 4.39 e 4.40. O sistema proposto possui capacidade para produzir materiais alternativos para 20.000 toneladas de mistura asfáltica por mês, o que seria suficiente para a construção de uma rodovia de 293 km em 1 ano.

$$\frac{U\$\$ 1.000.000,00 \times 100}{446,4} = U\$\$ 224.014,34 \quad (4.39)$$

$$U\$\$ 224.014,34 \times 5,20 = R\$ 1.164.874,57 \quad (4.40)$$

A receita bruta decorreu da economia atinente a inserção dos novos insumos, ou seja, R\$ 10,35 por tonelada. Consequentemente, a receita bruta mensal foi da ordem de R\$ 207.000,00, resultando em um valor anual de R\$ 2.484.000,00 (Equações 4.41 e 4.42).

$$R\$ 10,35 \times 20.000 = R\$ 207.000,00/mês \quad (4.41)$$

$$R\$ 207.000,00 \times 12 \text{ meses} = R\$ 2.484.000/ano \quad (4.42)$$

Considerou-se que nos dois primeiros anos de operação o projeto funcionaria com 60% e 80% de sua capacidade, respectivamente. Ressalta-se que nestas quantias estão descontadas as despesas e custos variáveis e fixos, pois o valor da economia obteve-se a partir do dispêndio do biochar e bio-óleo mostrados no item 4.3.2.2 deste trabalho. Desta forma, a receita torna-se diretamente o Lucro Líquido.

Nesse cenário, os produtos gerados não foram vendidos, mas somente empregados na formulação referência. Sendo assim, não ocorreu a incidência de impostos tanto sobre a venda (IPI, PIS/PASEP, COFINS, ICMS) quanto sobre o Lucro (IR e CSLL).

Para o cálculo da depreciação anual aplicou-se o percentual de 10% resultando em R\$ 116.487,46. Na Tabela 4.20 foi possível observar o Fluxo de Caixa do Empreendimento para o período de 10 anos correspondente a sua vida útil.

Conseqüentemente, o resultado da TIR foi da ordem de 143%, superior a TMA de 6,50%, o VPL se mostrou positivo de cerca de R\$ 14,4 milhões e o Payback foi igual a 0,49 anos, representando que em 180 dias, aproximadamente, é possível recuperar o investimento aplicado para a implantação da planta de pirólise.

Fluxo financeiro do Empreendimento							
Descrição	0 ano	1 ano	2 anos	3 anos	...	9 anos	10 anos
Receita Bruta (R\$)		1.490.400,00	1.987.200,00	2.484.000,00	...	2.484.000,00	2.484.000,00
(=) Lucro Líquido (R\$)		1.490.400,00	1.987.200,00	2.484.000,00	...	2.484.000,00	2.484.000,00
(-) Depreciação (R\$)		116.487,46	116.487,46	116.487,46	...	116.487,46	116.487,46
(=) Lucro Operacional (R\$)		1.373.912,54	1.870.712,54	2.367.512,54	...	2.367.512,54	2.367.512,54
(-) Investimentos (R\$)	1.164.874,57						
Fluxo de Caixa Empreendimento (R\$)	-1.164.874,57	1.373.912,54	1.870.712,54	2.367.512,54	...	2.367.512,54	2.367.512,54
Taxa Interna de Retorno	143%		TMA	6,50 %			
Payback (anos)	0,49		Taxa de Retorno Esperada	10%			
Dias para o retorno do investimento	179,59		Valor Presente Líquido (R\$)	14.398.363,02			

**Tabela 4.20** – Fluxo de caixa com os indicadores TIR, Payback e VLP para 100% de uso interno da produção.

#### 4.4.2 Segundo Cenário

No segundo cenário, analisou-se uma planta com capacidade para 500 toneladas por mês de bio-óleo, ou seja, material alternativo suficiente para produzir 100.000 toneladas por mês de mistura asfáltica, o equivalente a pavimentação de 1.465 km em um ano. Refletindo esse dado, o custo para a implantação do referido sistema configurou-se na ordem de R\$ 5.824.372,85, valor obtido multiplicando-se aquele do cenário 01 por 5 (Equação 4.43). Desse total 20% seriam usados como substituto do CAP dentro da própria usina e o restante (80%) seriam comercializados para os demais produtores de compósitos asfálticos localizados em Manaus/AM e região.

$$\text{R\$ } 1.164.874,57 \times 5 = \text{R\$ } 5.824.372,85 \quad (4.43)$$

Relativos aos preços de venda do bio-óleo e do biochar, estes foram estimados em R\$ 2.500,00 por tonelada e R\$ 50,00 por m<sup>3</sup> (metro cúbico), respectivamente, levando-se em conta os produtos a serem substituídos (CAP e pó de pedra). No caso do CAP o valor de mercado encontra-se em torno de R\$ 2.692,36 por tonelada e para o pó de pedra em R\$ 93,58 por m<sup>3</sup> (metro cúbico) (CAIXA, 2020).

Diante disso, a receita bruta mensal alcançou o valor de R\$ 1.000.444,44 e a anual de R\$ 12.005.333,33, tendo avaliado a operação da estrutura em sua capacidade máxima. O resultado do cálculo foi encontrado pelo produto do preço de venda pela quantidade fabricada por mês e tempo de produção.

O dispêndio fixo e variável determinou-se a partir da tonelada de bio-óleo, ou seja, o valor de R\$ 953,68. Logo, obtiveram-se o custo mensal de R\$ 381.472,00 e o anual de R\$ 4.577.664,00. O cálculo foi realizado pelo custo vezes a quantia e o tempo (CxQxT). Ressalta-se que, no fluxo de caixa elaborado, adotou-se nos dois primeiros meses 60% e 80% da produção máxima, respectivamente.

Nessa ótica, torna-se pertinente a consideração dos impostos sobre vendas (IPI, PIS/PASEP, COFINS, ICMS) e Lucro (IR e CSLL) incidentes no montante de produtos vendidos (80%). A depreciação anual foi calculada com 10% do capital investido resultando R\$ 582.487,29 por ano. Elaboraram-se os cálculos com base nas diretrizes da Receita Federal do Brasil (RFB). Na Tabela 4.21 visualiza-se o fluxo de caixa do empreendimento.

Assim, a TIR registrou um valor 66% superior à TMA de 6,50%, o VPL é positivo igual a R\$ 22,6 milhões e o Payback é de 1,21 anos, indicando que por volta de 434 dias será possível

recuperar a aplicação realizada para a construção da planta de pirólise.

Fluxo financeiro do Empreendimento								
Descrição	0 ano	1 ano		2 anos		...	10 anos	
		USO INTERNO (20%)	VENDA (80%)	USO INTERNO (20%)	VENDA (80%)		USO INTERNO (20%)	VENDA (80%)
Receita Bruta (R\$)			7.203.200,00		9.604.266,67	...		12.005.333,33
(-) Imposto Prop. s/ Vendas (R\$)			1.530.680,00		2.040.906,67	...		2.551.133,33
(=) Receita Líquida (R\$)			5.672.520,00		7.563.360,00	...		9.454.200,00
(-) Custos Fixos e Variáveis de Produção (R\$)			2.746.598,40		3.662.131,20	...		4.577.664,00
(=) Lucro Bruto (R\$)			2.925.921,60		3.901.228,80	...		4.876.536,00
(=) Lucro Líquido antes do IR (R\$)		1.490.400,00	2.925.921,60	1.987.200,00	3.901.228,80	...	2.484.000,00	4.876.536,00
(=) Lucro Líquido somado (R\$)		4.416.321,60		5.888.428,80		...	7.360.536,00	
(-) Depreciação (R\$)		582.437,29		582.437,29		...	582.437,29	
(=) Lucro Operacional somado (R\$)		3.833.884,32		5.305.991,52		...	6.778.098,72	
(=) Lucro Operacional (R\$)		907.962,72	2.343.484,32	1.404.762,72	3.318.791,52	...	1.901.562,72	4.294.098,72
(+) Resultado venda ativo (R\$)						...		
(=) Lucro Tributável (R\$)			2.343.484,32		3.318.791,52	...		4.294.098,72
IR/CSLL (R\$)			562.436,24		796.509,96	...		1.030.583,69
Lucro Líquido após o IR (R\$)		907.962,72	1.781.048,08	1.404.762,72	2.522.281,55	...	1.901.562,72	3.263.515,02
(-) Investimentos (R\$)	5.824.372,85					...		
Fluxo Caixa Empreendimento (R\$)	5.824.372,85	2.689.010,79		3.927.044,27		...	5.165.077,74	
Taxa Interna de Retorno	66%				TMA	6,50%		
Taxa de Retorno Esperada	10%				IR/CSLL	24%		
Valor Presente Líquido (R\$)	22.638.655,81							
Payback (anos)	1,215013893							
Dias para o retorno do investimento	443,4800709							

**Tabela 4.21** – Fluxo de caixa com os indicadores TIR, Payback e VLP, considerando a venda de 80% e o consumo interno de 20% da produção.

#### 4.4.3 Terceiro Cenário

Com relação ao terceiro cenário, examinou-se a implantação de uma estrutura para 500 toneladas por mês de bio-óleo, focando em atender a demanda das usinas de mistura asfáltica da cidade de Manaus/AM e tendo a exclusividade na venda dos materiais alternativos.

O investimento inicial estimado orçou em cerca de R\$ 5.824.372,85. Com funcionamento de 100% da capacidade produtiva e com o preço de venda do bio-óleo e do biochar de R\$ 2.500,00 por tonelada e R\$ 50,00 por m<sup>3</sup> (metro cúbico), respectivamente, concluiu-se uma receita mensal de R\$ 1.250.555,56 e anual igual a R\$ 15.006.666,67, por intermédio do mesmo procedimento adotado no cenário anterior.

Os custos de produção tanto fixos quanto variáveis foram obtidos a partir do valor de R\$ 953,68. A partir disso, calcularam-se o valor mensal de R\$ 476.840,00 e anual de R\$ 5.722.080,00 de forma análoga ao caso precedente. A porcentagem de impostos e de depreciação considerou-se igual ao do segundo cenário. Elaborou-se o fluxo de caixa, visualizado na Tabela 4.22, no qual, nos dois meses iniciais, a planta de pirólise operava com 60% e 80% de sua condição total.

Neste caso, a TIR apresentou valor de 56% superior à TMA de 6,50%, o VPL foi positivo e igual a R\$ 17,47 milhões, e o Payback registrou 1,48 anos, indicando que por volta de 543 dias ter-se-á a possibilidade de recuperar a aplicação efetivada para a construção da planta de pirólise.

Fluxo financeiro do Empreendimento							
Descrição	0 ano	1 ano	2 anos	3 anos	...	9 anos	10 anos
Receita Bruta (R\$)		9.004.000,00	12.005.333,33	15.006.666,67	...	15.006.666,67	15.006.666,67
(-) Imposto Prop. s/ Vendas (R\$)		1.913.350,00	2.551.133,33	3.188.916,67	...	3.188.916,67	3.188.916,67
(=) Receita Líquida (R\$)		7.090.650,00	9.454.200,00	11.817.750,00	...	11.817.750,00	11.817.750,00
(-) Custos Fixos e Variáveis de Produção (R\$)		3.433.248,00	4.577.664,00	5.722.080,00	...	5.722.080,00	5.722.080,00
(=) Lucro Bruto (R\$)		3.657.402,00	4.876.536,00	6.095.670,00	...	6.095.670,00	6.095.670,00
(=) Lucro Líquido antes do IR (R\$)		3.657.402,00	4.876.536,00	6.095.670,00	...	6.095.670,00	6.095.670,00
(-) Depreciação (R\$)		-582.437,29	-582.437,29	-582.437,29	...	-582.437,29	-582.437,29
(=) Lucro Operacional (R\$)		3.074.964,72	4.294.098,72	5.513.232,72	...	5.513.232,72	5.513.232,72
(=) Lucro Tributável (R\$)		3.074.964,72	4.294.098,72	5.513.232,72	...	5.513.232,72	5.513.232,72
IR/CSLL (R\$)		737.991,53	1.030.583,69	1.323.175,85	...	1.323.175,85	1.323.175,85
Lucro Líquido após o IR (R\$)		2.336.973,18	3.263.515,02	4.190.056,86	...	4.190.056,86	4.190.056,86

(-) Investimentos (R\$)	5.824.372,85				...		
Fluxo Caixa Empreendimento (R\$)	-5.824.372,85	2.336.973,18	3.263.515,02	4.190.056,86	...	4.190.056,86	4.190.056,86
Taxa Interna de Retorno	56%		TMA	6,50%			
Taxa de Retorno Esperada	10%		IR/CSLL	24%			
Valor Presente Líquido (R\$)	17.471.354,14						
Payback (anos)	1,488811973						
Dias para o retorno do investimento	543,4163701						

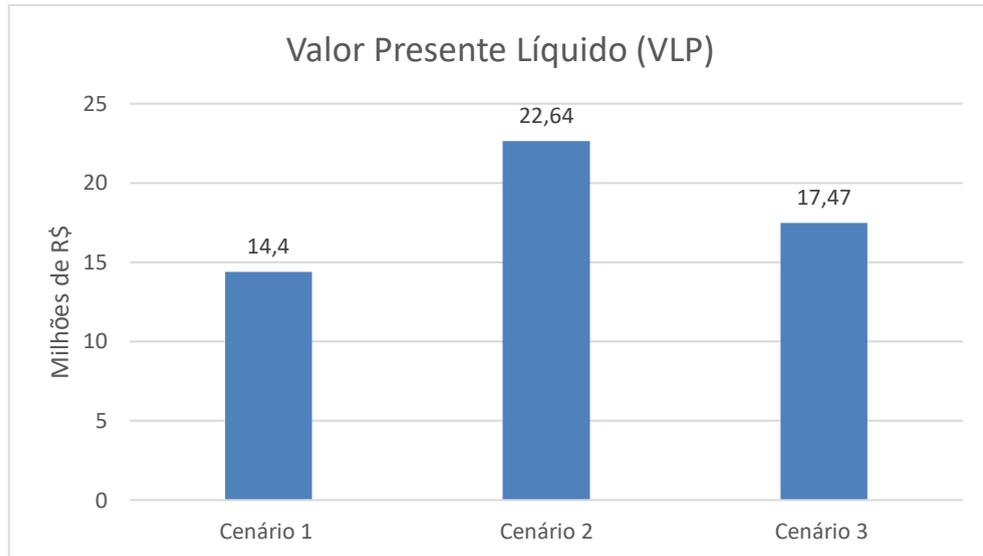
**Tabela 4.22** – Fluxo de caixa com os indicadores TIR, Payback e VLP considerando a venda de 100% da produção.

Na Tabela 4.23 realizou-se um comparativo entre os três cenários com relação ao VLP, TIR e Payback. Observa-se que, a quantia mais elevada do VLP foi da conjuntura dois com R\$ 22,64 milhões, a TIR mais elevada correspondeu a primeira situação com 143% e o Payback com maior valor foi da situação três com 543,41 dias.

Cenários	VLP (milhões de R\$)	TIR	Payback (dias)
Cenário 1	14,4	143%	179,59
Cenário 2	22,64	66%	443,48
Cenário 3	17,47	56%	543,41

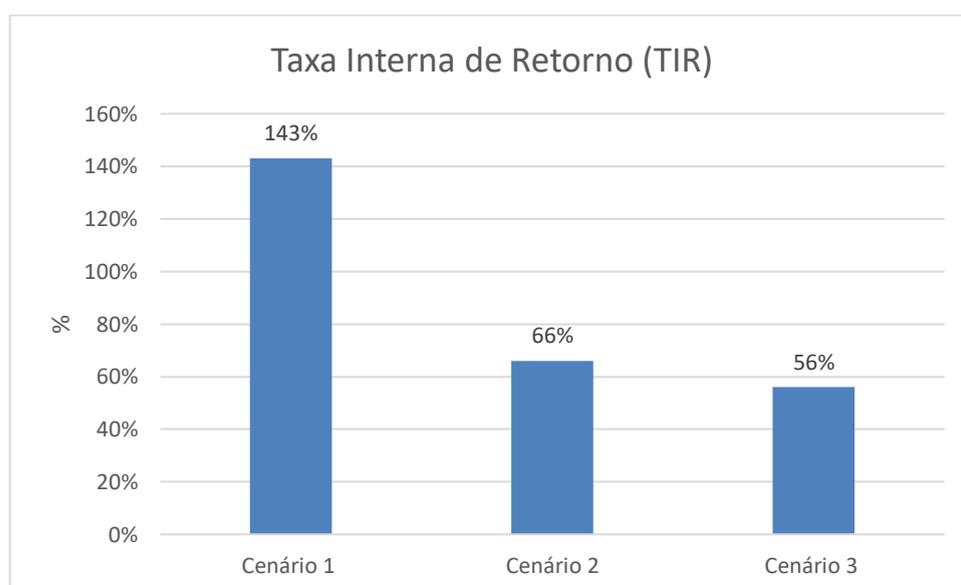
**Tabela 4.23** – Comparativo entre os indicadores de viabilidade econômica dos três cenários.

Especificamente ao VPL há uma diferença de R\$ 5,17 milhões entre os dois cenários mencionados (2 e 3), ou seja, 22,84%. Entre a situação 2 e 1 registrou-se uma desigualdade de R\$ 8,24 milhões (36,39%). Consoante aos cenários 1 e 3 o valor decresceu para R\$ 3,07 milhões (17,57%). No Gráfico 4.5 expõe-se os três VLPs dos casos estudados. Enfatiza-se que, o fato do cenário 2 possuir VPL superior foi justificado por dispor de maior capacidade produtiva relativo ao primeiro cenário, bem como estar inserido em um regime no qual ocorre tanto a venda (80%) quanto o aproveitamento da produção sem a comercialização (20%). Logo, não houve a incidência dos impostos e, conseqüentemente, elevação da margem de lucratividade do empreendimento.



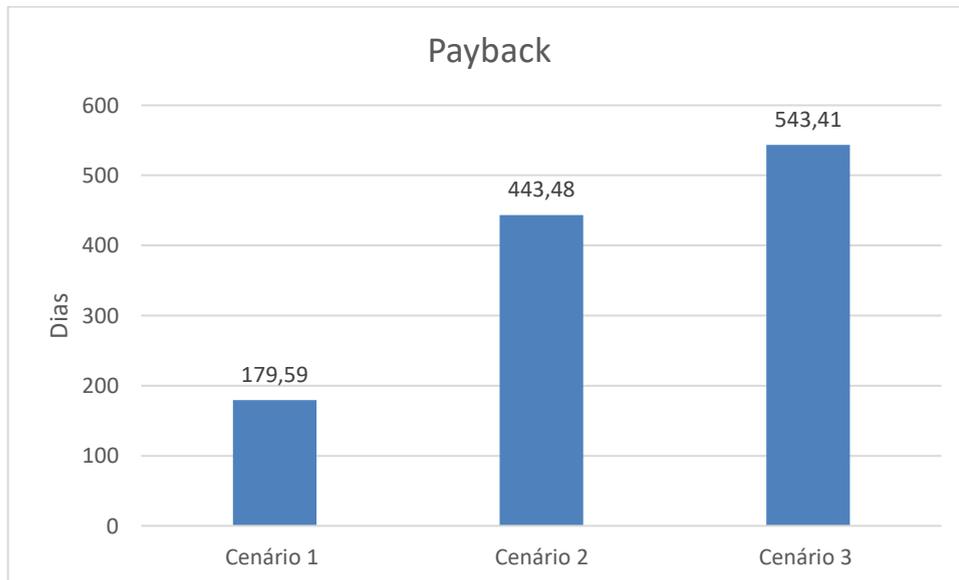
**Gráfico 4.5** – Comparativo entre o Valor Presente Líquido (VLP) dos três cenários.

No Gráfico 4.6 avaliou-se a TIR para as três circunstâncias pesquisadas. A desigualdade entre as duas melhores situações (1 e 2) foi de 77%. Apreciando a 1 e 3, bem como a 2 e 3, a diferença encontrou-se igual a 87% e 10%, respectivamente. Destaca-se que, a maior TIR para o cenário 1, deveu-se ao mesmo possuir menor investimento inicial e pela não aplicabilidade de impostos sobre a receita, visto que 100% da produção não foi comercializada, o que contribuiu para potencializar os ganhos líquidos. Esse contexto propiciou o aumento da segurança de retorno sob o capital aplicado ocasionando uma porcentagem maior da TIR.



**Gráfico 4.6** – Comparativo entre a Taxa Interna de Retorno (TIR) dos três cenários.

Em especial ao Payback (Gráfico 4.7) e tendo em conta que, neste caso, o menor valor é o mais vantajoso, verificou-se comparativamente entre os cenários 1 e 2 com 264 dias, entre o 1 e 3 de 364 dias, e para 2 e 3 o valor igual a 100 dias, aproximadamente. Desta forma, a conjuntura 1 foi aquela que permitiu de forma mais rápida a recuperação do capital investido. Explica-se pelo fato de ser aquele cenário com menor dispêndio inicial para o começo da operação do projeto.



**Gráfico 4.7** – Comparativo entre o Payback dos três cenários.

## **CAPÍTULO 5**

---

### **5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Analisou-se a viabilidade econômica da produção de misturas asfálticas usinadas a quente, contendo materiais alternativos, dentre os quais, bio-óleo como representante do ligante asfáltico convencional, bem como a cinza de termelétrica e o biochar na condição de substitutos parciais do pó de pedra.

Isto posto, comparou-se o custo de uma tonelada da formulação referência com aquela contendo a participação dos novos insumos. Alcançou-se uma economia de R\$ 0,21 por tonelada quando ocorreu a substituição de 5,15% do pó de pedra pela cinza de termelétrica. A maior redução ocorreu quando 10% do CAP tradicional é trocado pelo bio-óleo com valor de R\$ 8,53 (3,12%), chegando a R\$ 10,35 por tonelada (3,79%) quando também se tem a presença do biochar. Este comportamento pode ser explicado pelo fato de o CAP apresentar o maior custo dentro da composição.

Além disso, averiguou-se a implantação de plantas de pirólise em três cenários distintos. O primeiro, no qual a unidade atendia a apenas uma usina de mistura asfáltica, sem comercialização, determinou-se o valor da TIR igual a 143%, a qual é 2,17 maior ao obtido no segundo cenário (66%) e 2,55 superior ao calculado no terceiro (56%). Desta forma, apesar das três situações apresentarem TIR positiva e acima da TMA (6,50%), o primeiro apresentou-se como o mais seguro para a realização do investimento, porquanto possui maior capacidade de ser pago.

No tocante ao VPL, a segunda conjuntura, na qual 80% da produção é vendida e 20% é utilizada internamente, proporcionou o maior valor da ordem de R\$ 22,6 milhões, sendo 1,57 vezes superior ao primeiro (R\$ 14,4 milhões aproximadamente) e 1,29 vezes maior que o terceiro (cerca de R\$ 17,47 milhões). Mediante aos resultados, demonstrou-se que as três situações analisadas possuem VPL positivo, sendo a segunda aquela que oferece o maior ganho líquido após a amortização do investimento.

Quanto ao Payback, constatou-se que os prazos de amortização são de 180, 434 e 543 dias para os três cenários, respectivamente. Desta forma, o primeiro foi aquele que possuiu o menor risco, decorrente do menor tempo de recuperação da aplicação.

Por todo o exposto, conclui-se ser viável economicamente a utilização do resíduo de termelétrica, bio-óleo e biochar em formulações asfálticas. Destaca-se que, ocorre maior economia quando o insumo mais caro é substituído (CAP). Além disso, com referência a

implantação de uma estrutura para produção em larga escala do biochar e bio-óleo (planta de pirólise), o primeiro e o segundo cenário apresentam-se como os mais viáveis em termos econômicos. A escolha entre os dois melhores depende da capacidade de investimento, expectativa de retorno e da tolerância ao risco da empresa, pois o primeiro cenário se constitui naquele que possui menor risco e o segundo o mais rentável economicamente.

Por fim, a utilização da cinza de termelétrica, biochar e bio-óleo é recente em pesquisas voltadas a pavimentação. Desta forma, sugere-se para estudos futuros:

- a) Realizar a caracterização mecânica por aparelho de flexão a 04 pontos dos compósitos contendo os materiais alternativos;
- b) O emprego de novos teores da cinza de termelétrica e do biochar, como 10% e 12%;
- c) A utilização de novos teores do bio-óleo como substituto do CAP da ordem de 12% a 15%.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6576: **Materiais asfálticos – Determinação da penetração**. Rio de Janeiro, 2007.
- ANP- AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução ANP nº19/2005**, 2005.
- ASSAF NETO, Alexandre. **Finanças Corporativas e Valor**. 7. Ed. São Paulo: Editora Atlas, 2014.
- AYMERICH, Marta et al. **Measuring the payback of research activities: A feasible ex-post evaluation methodology in epidemiology and public health**. *Social Science & Medicine*, 2012. DOI <<https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2012.03.044>>. Acessado em 11 de maio de 2020.
- BACCI, D. L. C. **Aspectos e impactos ambientais de pedra em área urbana**. Esc. Minas, Ouro Preto, 59, 2006.
- BRIDGWATER, A. V. **Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. Biomass and bioenergy**, v. 38, p. 68-94, 2012.
- BRUNI, A. L. FAMÁ, R. **As decisões de investimentos**. São Paulo: Atlas, 2003.
- CALARGE, L.M, SILVA, N.I.W., CHIES, F. Zwosnok, O. **Desenvolvimento de tijolos maciços a partir de cinzas pesadas e cal hidratada – Caracterização de cinza pesada**. In: Frankenberg, C.L.C., Raya-Rodrigues, M.T., Cantelli, M. (Org). Gerenciamento de Resíduos Sólidos e Certificação Ambiental. Porto Alegre: EDIPUCRS, v. 1, p. 130 – 139, 2000.
- CAMARGO, I. G. N. **Potencial do emprego de bioligantes e agregados usinados a quente para revestimentos e bases de pavimentos**. Universidade de São Paulo, 2018.
- CECCONELLO, A. R.; AJZENTAL, A. **A construção do plano de negócio**. São Paulo: Saraiva, 2007
- CHEN, C. S.; HSEU, Y. C.; LIANG, S. H.; KUO, J.Y.; CHEN, S. C. **Assessment of genotoxicity of methyl-tert-butyl ether, benzene, toluene, ethylbenzene; and xylene to human lymphocytes using comet assay**. *Journal of hazardous materials*, v. 153, n. 1, p. 351 – 356, 2008.
- CHIES, F. SILVA, N.I.W. e ZWONOK, O. **Desenvolvimento de blocos e tijolos a partir de cinzas de fundo de carvão – CIPE – CAL**. In: Rocha J.C. e John, U.M. Utilização de Resíduos na Construção Habitacional. Coleção Habitare. V. 4, p. 218 – 239. Porto Alegre/RS,2003,
- DAMPIER, J.E.E., SHAHI, C., LEMELIN, R.H. *et al.* **From coal to wood thermoelectric energy production: a review and discussion of potential socio-economic impacts with implications for Northwestern Ontario, Canada**. *Energ Sustain Soc* **3**, 11 (2013). DOI <<https://doi-org.ez2.periodicos.capes.gov.br/10.1186/2192-0567-3-11>>. Acesso em 11 de maio de 2020.

DAVID, K. Ben, H. Muzzy, J. Feik, C. Lisa, K. Ragauskas, A. **Chemical characterization and water content determination of bio-oils obtained from various biomass species using NMR spectroscopy**. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.4155/bfs.12.1>>. Acesso em 03 de março de 2019.

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

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. 043/1995: **Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall**. Rio de Janeiro, 1995.

DNIT- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. 55/2010-ME: **Material asfáltico – determinação da penetração – Método de Ensaio**. Rio de Janeiro, 2010.

DUTTA, BK, KHANRA, S. e MALLICK, D. "Lixiviação de elementos a partir de cinzas volantes de carvão: Avaliação de seu potencial para uso em envase minas de carvão abandonadas". *Combustível*, 2009, 88 (7), 1314–1323.

EROL, M. Küçükbayrak, S., Ersoy-Meriçboyu, A. **Characterization of coal fly ash for possible utilization in glass production**. *Fuel* 86, p. 706 – 714, 2007.

FALÇÃO, Newton Paulo de Souza, BORGES, Lillian França. **Efeito da Fertilidade de terra preta de índio da Amazônia Central no estado nutricional e na produtividade do mamão hawaí (Carica papaya L.)**. *Acta Amaz.* Vol. 36. n. 4, 2016. DOI: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0044-59672006000400001>>. Acesso em 17 de maio de 2020.

FERNÁNDEZ, A. V. **Influência de la dosificación y empleo de diferentes tipos de cemento y adiciones en las propiedades mecánicas del hormigón autocompactante**. 2009. Tesis (Doctoral) – Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2009.

FINI, E. M. HOSSEINNEZHAD, S. OLDHAM, D. J., CHAILLEUX, E.; GAUDEFROY, V. **Source dependency os rheological and surface characteristics of bio-modified asphalts**. *Road Materials and Pavement Design*, v. 18, n. 2, p. 408-424, 2017.

GUO J, Guo J, Xu Z (2009) **Recycling of non-metallic fractions from waste printed circuit boards: A review**. *J Hazard Mater* 168:567–590

HALL W, WILLIAMS P. **Separation and recovery of materials from scrap printed circuit boards**. *Resour Conserv Recycl* 51:691–709. 2007

HALL, K. D. **Using a single test to determine specific gravity and absorption of aggregate blends**. *Transportation Research Board*. Washington, 2001.

HANDAYANI, F. S. **Agency cost estimation on flexible and rigid pavement**. *MATEC Web of Conferences*, v. 258, p. 02020, 2019.

IPR - INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS. Publicação IPR-719: Manual de

JUHASZ, László, TORBEN Fichtner, AXEL Kiffe, JURGEN Maas. **Model-Based State-Space Control of Hibrid Micropositioning Systems**. *IFAC Proceedings Volumes*, 2010. DOI: <<https://doi.org/10.3182/20100913-3-US-2015.00119>> . Acesso em 12 de maio de 2020.

KRONBORG, MORTEN TOLVER. STEFFENSER, MOGENS. **Optimal consumption, investment and life insurance with surrender option guarantee.** Scandinavian Actuarial Journal, 2013.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (Ed.). **Biochar for environmental management: Science and technology**, London: Earthscan, 2009. P. 1-12.

LIMA, S. L. **Biochar no manejo de nitrogênio e fósforo para a produção de mudas de angico.** Universidade Federal de Mato Grosso, Nova Xavantina, 2016. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/pab/v51n2/1678-3921-pab-51-02-00120.pdf>>. Acesso em 25 de fevereiro de 2019.

LINDEMEYER, R. M. **Análise da viabilidade econômico-financeira do uso do biogás como fonte de energia elétrica.** Trabalho de Conclusão de Estágio apresentada à disciplina de Estágio Supervisionado – CAD 5236, como requisito parcial para obtenção de grau de Bacharel em Administração da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

LONG, L.S, SUN, S.Y., ZHONG, S., DAI, W.C., LIU, J.Y., SONG, W.F. **Using vacuum pyrolysis and mechanical processing for recycling waste printed circuit boards.** J. Hazard. Mater. 177 (1 – 3), 626 – 632, 2010.

LOPES, J. L. **Riscos para a saúde de trabalhadores de pavimentação com asfalto.** Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente, v. 3, n.3, São Paulo, 2008.

LUDA, M.P. **Recycling of printed circuit boards.** *Integrated Waste Management*, v. II, p. 285 – 296, 2011.

MEDEIROS, Natália M. **Caracterização e Separação Física de Placa de Circuito Impresso de Computadores Obsoletos – Natal – RN**, 2015. 82f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2015.

MOHAMMAD, L. N; ELSEIFI, M. A.; COOPER, S. B.; CHALLA, H.; NAIDOO, P. **Laboratory evaluation of asphalt mixtures containing bio binder technologies.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, n. 2371, p. 58-65, 2013.

MORAES, Viviane T. **Recuperação de Metais a partir do Processamento Mecânico e Hidrometalúrgico de Placas de Circuito Impressos de Celulares Obsoletos.** Dissertação (Doutorado em Engenharia) – Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade de São Paulo, 2011.

MYTHILL, R. VENKATACHALAN, P. SUBRAMANIAN, D. UMA. **Characterization of bioresidues for biooil production through pyrolysis.** *Bioresource Technology*, Volume 138, pages 71 – 78, 2013. DOI <<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.03.161>>. Acesso em 17 de maio de 2020.

NAIA, Gumercindo Lúcio. **Desenvolvimento de produto sustentável: apresentação de placas de circuito impresso descartadas como agregado na fabricação de blocos de alvenaria para construção civil.** Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Itajubá/MG, 2014.

NUNES, S. A. **Influência do uso de retardantes de chama halogenados e não halogenados em poliolefinas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

OZDEMIR, O., ERSOY, B., CELIL, M.S. **Separation of pozzolanic materials from lignitic fly ash of Tuncbilek Power Station.** In: **Internacional Ash Utilization Symposium, 4**, Lexington, Kentucky, USA, Proceedings, University of Kentucky, p. 216 – 234, 2001.

PANNIRSELVAM, P. V. et al. **Desenvolvimento de projeto para produção de fibra de coco com inovação de tecnologia limpa e geração de energia.** Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Revista Analytica, São Paulo, n. 15, p. 56-61, fev./mar. 2005.

PÉREZ, Ignacio Pérez. PASANDIN, Ana Maria Rodriguez, PAIS, Jorge Carvalho. PEREIRA, Paulo Antonio Alves. **Use of lignina biopolymer from industrial waste as bitumen extender for asphalt mixtures.** Journal of Cleaner Production, 2019.

RAOUF, M. A.; WILLIAMS, R.C. **Determination of pre-treatment procedure required for developing bio-binders from bio-oils.** In: Proc., 2009 Mid-Continent Transportation Research Symposium, 2009.

SILVA, J. R. da. **Análise da viabilidade econômica da produção de peixes em tanques-rede no reservatório de Itaipu.** Dissertação. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

SINGH, M. **Effect of coal bottom ash on strength and durability properties of concrete.** Punjab, 2015. Thesis (Ph. D. Civil Engineering) – Thapar University, India, 2015.

SIVAPULLAIAH, PV e MOGHAL, AAB (2010). “**Lixiviação de rastreamento elementos de duas cinzas volantes indianas estabilizadas de baixo cal.**” Environ. Terra Sci. , 61 (8), 1735-1744.

TISHMACK, J.K. **Use of coal combustion by-products to reduce soil erosion.** In: **Internacional Ash Utilization Symposium, 4**, Lexington, Kentucky, USA, Proceedings, University of Kentucky, p. 216-234, 2001.

TORRES, A. P. **Compósitos com Biochar e Cinza de termelétrica para Camadas de Pavimentos Asfálticos.** Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2018.

TOZZI, Laís Pereira. **Reciclagem de Placas de Circuito Impresso para Obtenção de Metais Não Ferrosos.** Trabalho de Conclusão de Curso apresentado na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.

TROMBULAK, S. C.; FISSELL, C. A. **Review of ecological effects of roads on terrestrial and aquatic communities.** Conservation biology, v. 14, n. 1, p. 18-30, 2000.

UNIVERSIDADE DE SANTA CECÍLIA. **As decisões de investimento.** Disponível em: <<http://www.unisanta.br/materialdidaticorm/arquivos%5CAULA20FLUXODECAIXAINCR EMETALa93725.doc>>. Acesso em 16 de maio de 2020.

USEPA (Agência de Proteção Ambiental dos EUA). “**Humano e avaliação de risco ecológico de resíduos de combustão de carvão**”. Washington, DC, 2007.

VASSILEV, S.V., MENENDEZ, R., ALVAREZ, D., BORREGO, A.G. **Multicomponent utilization of fly ash: dream or reality.** In: **International Ash Utilization Symposium, 4**, Lexington, Kentucky, USA, Proceedings, University of Kentucky, p. 216 – 234, 2001.

VIEIRA, G.E.G. et al. **O processo de pirólise como alternativa para o aproveitamento do**

**potencial energético de logo de esgoto – uma revisão.** Revista Liberato. Novo Hamburgo, v. 12, n. 17, p. 01 – 106, jan/jun, 2011.

**VILCHES, L.F. Development of new fire-proof products made from coal fly ash: the Cefyr Project.** *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, v. 77, p. 361 – 366, 2002.

**WANG, H.; DEREWECKI, K. Rheological Properties of Asphalt Binder Partially Substituted with Wood Lignin.** In: *Airfield and Highway Pavement 2013: Sustainable and Efficient Pavements*. P. 977-986. 2013.

**XAVIER, Marioleide de Farias. Avaliação do uso de cinzas de carvão mineral como melhorador de adesividade em misturas asfálticas.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, 2016.

**YANG, C; MILLS-BEALE, J.; YOU, Z. Chemical characterization and oxidative aging of bio-asphalt and its compatibility with petroleum asphalt.** *Journal of Cleaner Production*, v. 142, p. 1837-1846, 2013.

**YANG, X.; MILLS-BEALE, J.; YOU, Z. Asphalt binders blended with a high percentage of bio binders: aging mechanism using FTIR and rheology.** *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 27, n. 4, 2014.

**YANG, X; YOU, Z; DAI, Q; BEALE, J. Mechanical performance of asphalt mixtures modified by bio-oils derived from waste wood resources.** *Construction and Building Materials*, vol. 51; p. 424 – 431, 2014.

**YANG, X; SUIYU S.; ZHONG S.; LI S; WU J. Performance of the heavy fraction of pyrolysis oil derived from waste printed circuit boards in modifying asphalt.** *Journal of Management*, vol. 126; p. 1 – 6, 2013.

**ZHANG, I. F. CUI, J. R. Metallurgical recovery of metals from electronic waste: a review.** *Journal of Hazardous Materials*. v. 158, p. 228 – 256, 2008.

**ZHAO, S.; HUANG, B.; SHU, X.; YE, P. Laboratory Investigation of Biochar-Modified Asphalt Mixture Enhancing asphalt rheological behavior and aging susceptibility using bio- char and nano-clay.** *Transportation Research Record*, vol. 2445, p. 56-63, 2014.

**ZHAO, S.; HUANG, B.; SHU, X.; YE, P.; JIA, X. Utilizing bio-char as a bio-modifier for asphalt cement: A sustainable application of bio-fuel by-product.** *Elsevier*, vol. 133, p. 52-62, 2014.

**ZWONOK, O.; CHIES, F.; SILVA, N. I. W. Cinzas de carvão no Brasil: características e possibilidades de uso.** *Porte Alegre. CIENTEC*, 2006.