

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
GOIÁS – IFG CAMPUS GOIÂNIA
DEPARTAMENTO DE ÁREAS ACADÊMICAS III
CURSO BACHARELADO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES

**CARACTERIZAÇÃO DA CINZA DE EUCALIPTO
PARA APLICAÇÃO EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**

**Katielle de Souza Lima
Sandy Toledo de Barros
Stefanny Luciane Pereira de Jesus**

GOIÂNIA
DEZEMBRO, 2021

Katielle de Souza Lima
Sandy Toledo de Barros
Stefanny Luciane Pereira de Jesus

Caracterização da cinza de eucalipto para uso em pavimentos flexíveis

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia de Transportes do Departamento de Áreas Acadêmicas III, do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Goiás – Campus Goiânia, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Transportes.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Freire Gonçalves

GOIÂNIA
DEZEMBRO, 2021

L732c Lima, Katielle de Souza.

Caracterização da cinza de eucalipto para aplicação em pavimentos flexíveis / Katielle de Souza Lima; Sandy Toledo de Barros; Stefanny Luciane Pereira de Jesus. – Goiânia : Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2021.
58f. ; il.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Freire Gonçalves.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso de Bacharelado em Engenharia de Transportes, Departamento de Áreas Acadêmicas III, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

1. Pavimentação. 2. Sustentabilidade. 3. Estudo de viabilidade. I. Barros, Sandy Toledo de. II. Jesus, Stefanny Luciane Pereira de. III. Gonçalves, Ricardo Freire (orientador). IV. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. V. Título.

CDD 625.8

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Lana Cristina Dias Oliveira CRB1/ 2.631
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Kathelle de Souza Lima

Matrícula: 20171014180352

Título do Trabalho: caracterização da cinza de eucalipto para o uso em pavimentos flexíveis.

Autorização - Marque uma das opções

- ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
- ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
- ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2** ou **3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia _____ 19/10/22
Local Data

Kathelle de Souza Lima
Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Sandy Toledo de Barros

Matrícula: 2017101180514

Título do Trabalho: Caracterização da cinza de eucalipto para o uso em pavimentos flexíveis

Autorização - Marque uma das opções

- ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
- ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
- ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2** ou **3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia, 19 / 01 / 2022.
Local Data

Sandy Toledo de Barros
Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia - Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Stephany Luciane Rêgo de Jesus
Matrícula: 20171011180328
Título do Trabalho: Caracterização da cinza de eucalipto para uso em
Produtos flexíveis

Autorização - Marque uma das opções

- ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
- ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
- ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia
Local

19/01/22
Data

Stephany Luciane Rêgo de Jesus

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Katielle de Souza Lima
Sandy Toledo de Barros
Stefanny Luciane Pereira de Jesus

CARACTERIZAÇÃO DA CINZA DE EUCALIPTO PARA USO EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia de Transportes do
Departamento de Áreas Acadêmicas III, do Instituto
Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Goiás –
Campus Goiânia, como requisito parcial para obtenção do
título de bacharel em Engenharia de Transportes.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Freire Gonçalves

Aprovado em: 21/12/2021

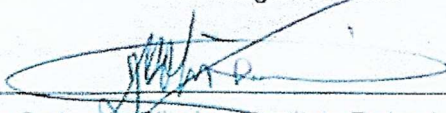
Banca Examinadora:



Prof. Dr. Ricardo Freire Gonçalves – Instituto Federal de Educação Ciência e
Tecnologia de Goiás (Orientador)



Prof. M.Sc. Giovane Batalione – Instituto Federal de Educação Ciência e
Tecnologia de Goiás



Prof. Dr. João Carlos de Oliveira – Instituto Federal de Educação Ciência e
Tecnologia de Goiás

*Dedicamos este trabalho a Deus e às nossas famílias,
sem os quais não seríamos quem somos hoje.*

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente à Deus pela força que nos foi dada para chegarmos até aqui e a capacidade para realizarmos essa trajetória.

Às nossas famílias e parceiros por todo o apoio durante esses anos. Sem vocês ao nosso lado não teríamos a coragem e a força para realizarmos esse sonho.

Ao nosso orientador Dr. Ricardo Freire Gonçalves, por ter aceitado esse desafio. Sua parceria, paciência, instrução e atenção foram fundamentais para conseguirmos realizar esse trabalho, e também esses cinco anos de graduação.

À professora Dr^a Luciana Araújo Azevedo, por todo apoio e paciência durante essa pesquisa. Suas orientações, atenção, carinho e empenho conosco durante todos esses anos, e em especial nesse último, foram de grande valia para nós.

À empresa Lasa Soja e Álcool na pessoa de Diego Bortolan pela doação do material, que foi separado e preparado com todo o cuidado para nós.

Aos técnicos Alfredo e Sandro por toda a dedicação, tempo e paciência oferecidos, e ainda a disposição a nos receber nos laboratórios durante a Pandemia.

Aos professores do Departamento III e à Coordenação de Engenharia de Transportes, por todo o empenho para que fosse possível a realização desse trabalho e a amizade e carinho conosco durante esses anos de graduação.

Agradecemos ao IFG Campus Goiânia que foi nossa segunda casa por tantos anos e nos recebeu prontamente para utilização de suas dependências mesmo em um período tão difícil.

Aos nossos colegas de classe, pela amizade, parceria e apoio durante todos esses anos. Conseguimos juntos chegar até aqui e são pessoas e lembranças que temos conosco com orgulho.

*"Fracassar é parte crucial do sucesso.
Toda vez que você fracassa e se recupera,
exercita perseverança que é a chave da vida.
Sua força está na habilidade de se recompor."*

Michelle Obama

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Evolução da condição da superfície do pavimento nas Rodovias Públicas (em %).	5
Figura 2.2– Classificação Geral das rodovias do estado de Goiás.	7
Figura 2.3 – Esquema de seção transversal do pavimento flexível.	8
Figura 2.4 - Carga verticalmente aplicada no subleito.	10
Figura 2.5 – Classificação da base e sub-base.	11
Figura 3.1 – Britador de Mandíbula.	16
Figura 3.2 - Esquema da fabricação da mistura asfáltica com asfalto-borracha pelo processo de via úmida	18
Figura 3.3 – Ciclo de vida do pavimento	19
Figura 3.4 – Aspecto do material fresado de revestimento asfáltico.	21
Figura 3.5 – Diversos tipos de resíduos da madeira	22
Figura 3.6 - Detalhes construtivos da execução da pista	26
Figura 4.1 - Cinzas do cavaco de Eucalipto	29
Figura 4.2 – Realização de ensaio de Massa específica – NBR 6458 (2016)	31
Figura 4.3 - Preparação para ensaio de teor de umidade	33
Figura 4.4 – Preparação para determinação da granulometria.	34
Figura 4.5 – Dimensões das Partículas	35
Figura 4.6 – Ensaio de Limite de Liquidez	36
Figura 4.7 – Material preparado para ensaio de Limite de Plasticidade	37
Figura 4.8 – Material utilizado para o ensaio – 500 gramas	38
Figura 4.9 – Preparação para ensaio de Compactação.	39
Figura 4.10 – Compactação do material.	40
Figura 4.11 – Remoção da amostra de compactação	40
Figura 5.1 – Curva Granulométrica do material.	45
Figura 5.2 – Caracterização do material por porcentagem de areia.	45
Figura 5.3 - Comportamento da cinza durante preparação de ensaio de Limite de Liquidez	46
Figura 5.4 - Material após aplicação de golpes no aparelho de Casagrande	47
Figura 5.5 - Material na placa de vidro para determinação de Limite de Plasticidade	47
Figura 5.6 - Comportamento do material durante a realização de ensaio de Limite de Plasticidade	48

Figura 5.7 – Gráfico de Compactação	50
Figura 5.8 - Material pós atrito	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Estado geral de conservação das rodovias sob gestão pública e privada em 2004 e 2011	6
Tabela 2.2 – Condição de Superfície do Pavimento	6
Tabela 3.1 - Características da pista experimental de Goiânia	26
Tabela 5.1 - Dados obtidos para determinação de massa específica	42
Tabela 5.2 - Resultados de ensaio de determinação de massa específica	42
Tabela 5.3 - Resultados do segundo ensaio de massa específica	43
Tabela 5.4 – Dados para determinar umidade	43
Tabela 5.5 – Dados obtidos do ensaio de granulometria	44
Tabela 5.6 – Dados iniciais para compactação	48
Tabela 5.7 – Umidade do material (Ensaio de Compactação)	49
Tabela 5.8 – Grau de Saturação, Índice de Vazios e Densidade Seca	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADP	Asfalto Diluído
ANEPAC	Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção
AMB	Asfalto Modificado por Borracha
AMP	Asfalto Modificado por Polímeros
ARE	Agentes Rejuvenescedores
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado à Quente
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DERSA	Desenvolvimento Rodoviário S/A
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EAP	Emulsão Asfáltica
FIPE	Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas da Universidade de São Paulo
g	Gramas
g/cm ³	Gramas por centímetro cúbico
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
ISC	Índice de Suporte Califórnia
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
mm	Milímetros
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
NCHRP	<i>National Cooperative Highway Research Program</i>
RCD	Resíduos de construção e demolição

RESUMO

No Brasil, o transporte rodoviário é o principal modo utilizado na movimentação de pessoas e cargas, tendo ainda um volume considerável de estradas para serem pavimentadas, colocando em risco a escassez dos materiais utilizados. Considerando-se a quantidade de resíduos gerados pelas indústrias na queima de madeira para geração de energia que são descartados de forma não sustentável, procuram-se alternativas para a destinação desse material. O objetivo geral deste trabalho foi avaliar o uso da cinza de madeira na pavimentação, através de suas características apresentadas a partir da análise granulométrica e de caracterização física do material, verificando ainda o índice de plasticidade e os resultados de compactação. Os resultados de caracterização do material, por meio da determinação da massa específica não atenderam aos índices exigidos pela norma e através da granulometria identificou-se o material predominante como fino, sendo 25,36% de areia fina. A determinação do índice de plasticidade da cinza não foi possível devido as suas características e seu comportamento durante a realização do ensaio, classificando-o como um material não plástico. A partir da curva do gráfico de compactação, observou-se que o material não apresentou características adequadas para a determinação da umidade ótima e densidade seca máxima. A cinza de madeira, quando avaliada isoladamente, não apresenta as características necessárias de um material aplicado na pavimentação.

Palavras-chaves: Cinza de madeira. Pavimentação. Sustentabilidade.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2	HIPÓTESE	2
1.3	OBJETIVOS	2
1.3.1	Objetivo geral.....	2
1.3.2	Objetivos específicos.....	2
1.4	JUSTIFICATIVA	2
1.5	METODOLOGIA	3
2	PAVIMENTAÇÃO.....	4
2.1	MALHA RODOVIÁRIA BRASILEIRA	4
2.2	ESTRUTURA DO PAVIMENTO RODOVIÁRIO	7
2.2.1	Subleito.....	9
2.2.2	Regularização.....	10
2.2.3	Reforço do Subleito	10
2.2.4	Sub-base	11
2.2.5	Base	12
2.2.6	Revestimento.....	12
3	PAVIMENTAÇÃO COM AGREGADO RECICLADO	13
3.1	PAVIMENTO SUSTENTÁVEL	13
3.2	MATERIAIS RECICLÁVEIS UTILIZADOS NA PAVIMENTAÇÃO	14
3.2.1	Resíduos de construção civil	14
3.2.2	Borracha de pneus	17
3.2.3	Resíduos de pavimento	19
3.2.4	Resíduos de madeira.....	22

3.3	PAVIMENTAÇÃO COM AGREGADO RECICLADO NO MUNDO	23
3.4	PAVIMENTAÇÃO COM AGREGADO RECICLADO NO BRASIL	24
3.5	CINZAS DE MADEIRA NA PAVIMENTAÇÃO	27
4	MATERIAIS E MÉTODOS	29
4.1	MATERIAIS	29
4.2	MÉTODOS	29
4.2.1	Massa específica	29
4.2.2	Teor de umidade	32
4.2.3	Granulometria	33
4.2.4	Limite de liquidez e plasticidade	35
4.2.5	Compactação (Proctor normal)	38
5	ANÁLISE DE RESULTADOS	42
5.1	MASSA ESPECÍFICA	42
5.2	TEOR DE UMIDADE	43
5.3	GRANULOMETRIA	44
5.4	LIMITE DE LIQUIDEZ E PLASTICIDADE	46
5.5	COMPACTAÇÃO (PROCTOR NORMAL)	48
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
	ANEXO A – NBR 6458	58

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Em 2001, a malha viária total do Brasil era de mais de 1.748.000 quilômetros, sendo apenas 170 mil quilômetros pavimentados. Já em 2015, esse número cresceu cerca de 23,2%, passando para um total de 213.453 quilômetros de rodovias pavimentadas (CNT, 2019).

A pavimentação é essencial no Brasil, onde mais da metade das cargas são transportadas pelo modo rodoviário, possuindo importância para a sociedade e principalmente, no meio econômico. Porém, a falta da pavimentação nas rodovias e a má qualidade da infraestrutura colocam em risco a vida de milhões de brasileiros que circulam por essas vias todos os dias. Sendo assim, a solução passa, necessariamente, por investimentos em infraestrutura.

O volume de estradas para serem pavimentadas no Brasil é extenso, sendo necessários novos recursos que proporcionem durabilidade, economia e segurança para evitar a escassez dos materiais já utilizados.

Atualmente no Brasil, árvores são plantadas para fins de processamento industrial, sendo a madeira uma fonte de energia, utilizada nas caldeiras. Segundo Louzada Junior *et al.*, essa utilização pode gerar cerca de 47,8 milhões de toneladas de resíduos de cinzas por ano. Esses resíduos são descartados na natureza, sem uma destinação apropriada e geralmente encaminhados aos aterros, aumentando os impactos ambientais.

Após o uso do eucalipto nas indústrias que realizam a queima de madeira para obtenção de energia, sobra-se as cinzas que se tornam descartáveis para o setor industrial. Buscando a reutilização desse material, a discussão dessa problemática é fundamental para reduzir os impactos ambientais.

1.2 HIPÓTESE

O uso da cinza de madeira nos pavimentos flexíveis pode ser viável para contribuir na resistência da estrutura e na preservação do meio ambiente.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Realizar a caracterização da cinza de madeira como material de pavimentação rodoviária através do estudo de propriedades físicas e mecânicas.

1.3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar a granulometria, o teor de umidade e a massa específica do material estudado;
- Avaliar a plasticidade do material através de ensaios de consistência;
- Analisar a estabilidade da cinza estudada através de ensaio de compactação.

1.4 JUSTIFICATIVA

Segundo Louzada Júnior *et al.* (2017), 70,5% dos resíduos de madeira gerados são provenientes das atividades florestais e 29,5% das atividades industriais, sendo 25% resíduos (serragens, cavacos, entre outros) que podem ser utilizados como matéria prima para as empresas madeireiras e 66% resíduos que são derivados da produção de energia.

Entre as alternativas possíveis para destinação dos resíduos, os aterros são os mais utilizados. A decomposição em aterros causa problemas ao meio ambiente a médio e longo prazo, dependendo do tipo de resíduo depositado no mesmo.

O presente trabalho procura avaliar o uso da cinza proveniente da queima da madeira de eucalipto, gerada pelas usinas, no pavimento flexível, e consequentemente, contribuir para a redução do número de futuros aterros de cinza ao utilizá-la em obra rodoviária.

Sendo assim, esse trabalho se justifica em busca de alternativas sustentáveis para gestão dos resíduos provenientes da queima da madeira, visando uma estrutura de pavimento com boa resistência, custo acessível e, principalmente, sustentável.

1.5 METODOLOGIA

A metodologia aplicada foi por meio do método semi-empírico para analisar a eficiência da cinza da madeira nos pavimentos rodoviários. A pesquisa é caracterizada como descritiva, pois serão avaliadas as características físico-mecânicas da cinza e se estas são compatíveis com as propriedades dos materiais comumente usados em pavimentação, por meio da aplicação de ensaios.

Para atender aos objetivos propostos, serão realizadas revisões bibliográficas do tema sugerido como o estudo dos pavimentos flexíveis, a utilização de materiais recicláveis, o resíduo proveniente da queima de madeira e a sua aplicação. Após o diagnóstico da teoria, será realizada a caracterização da cinza através dos ensaios laboratoriais para determinar propriedades físicas e mecânicas do material estudado.

2 PAVIMENTAÇÃO

2.1 MALHA RODOVIÁRIA BRASILEIRA

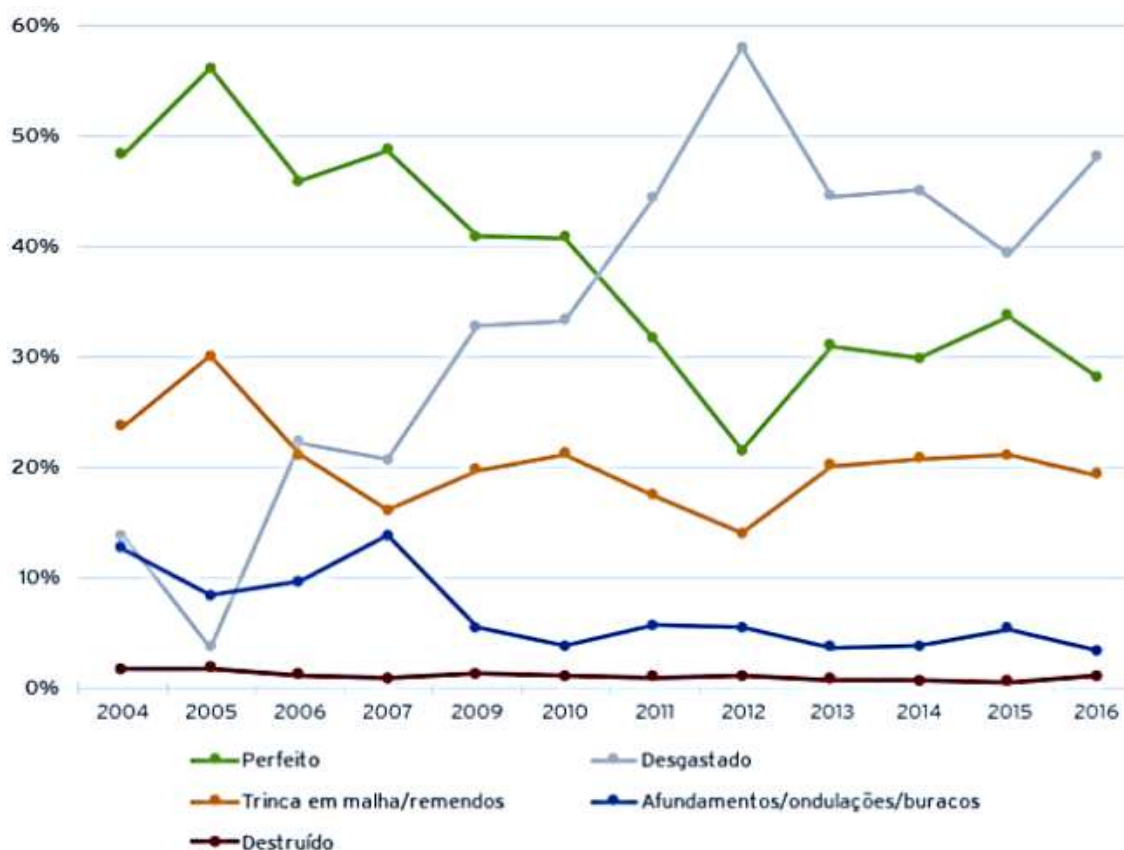
Atualmente, mais de 60% das cargas transportadas nacionalmente e 90% do tráfego de passageiros são deslocadas pelo modo rodoviário, justificado pelo fácil acesso, menor custo e capacidade para menores volumes. Com tamanha importância na locomoção do país, é fundamental investimentos em manutenção, construção e infraestrutura, buscando garantir eficiência, economia e segurança para o usuário.

A maior parte do transporte brasileiro de cargas ocorre com produtos do setor agrícola, seja para chegada dos insumos, quanto para escoamento da produção para mercados internos e externos. A justificativa da escolha pelo modo rodoviário está no custo relativo da construção de uma rodovia e no planejamento de curto prazo.

O Brasil possui uma malha rodoviária de 1.691.215 km de extensão, sendo a terceira maior do planeta em termos de comprimento, onde 1.261.745 km estão na responsabilidade dos governos municipais, e somente 212.414 km são de responsabilidade dos governos estaduais e federais (CNT, 2012). Segundo o Ministério da Infraestrutura, a extensão da malha rodoviária federal do Brasil em 2019 era de 75,8 mil quilômetros, dos quais 10,4 mil não eram pavimentados.

Em 2017, a CNT fez uma avaliação e identificou que 48,3% das rodovias brasileiras eram classificadas como regulares/ruins ou péssimas. Isso justifica o aumento nos custos operacionais do transporte, já que é constatado o consumo extra de combustível em função do estado das rodovias. A Figura 2.1 demonstra a evolução da condição de deterioramento dos pavimentos que estão sob gestão pública.

Figura 2.1 – Evolução da condição da superfície do pavimento nas Rodovias Públicas (em %).



Fonte: CNT, 2017.

Observa-se que nos anos de 2005 a 2012 a porcentagem dos pavimentos considerados desgastados aumentou mais de 50%, enquanto as rodovias com estado perfeito caíram aproximadamente 30% no mesmo período, mantendo estável o índice considerado destruído. Além disso, é possível identificar que em 2016 a maioria das rodovias públicas estavam em estado desgastado.

É comum no país a construção de rodovias com Concreto Betuminoso Usinado à Quente - CBUQ, devido ao baixo custo comparado ao das rodovias de Concreto de Cimento Portland. As vias rodoviárias brasileiras não possuem a qualidade desejada, isso porque sofrem deformações constantes, seja pela variação do clima ou pelo peso não controlado das cargas transportadas, reduzindo assim sua durabilidade e seu desempenho. Devido a baixos investimentos na malha rodoviária brasileira são necessários elevados gastos com sua recuperação.

As rodovias concedidas à iniciativa privada apresentam estado melhor do que aquelas sob direção pública. A Tabela 2.1 apresenta a classificação geral dessas rodovias

entre os anos de 2004 e 2011, onde os dados mostram o aumento de rodovias em ótimas e boas condições de ambas as gestões, principalmente as rodovias públicas, que tiveram um aumento de 98,8%. Observa-se na Tabela 2.1 que com a administração pública existe um maior número de trechos classificados como regulares, ruins ou péssimos.

Tabela 2.1 – Estado geral de conservação das rodovias sob gestão pública e privada em 2004 e 2011

	2004 (%)		2011 (%)		Variação no período (%)	
	Pública	Privada	Pública	Privada	Pública	Privada
Estado Geral						
Ótimo e Bom	17,0	78,4	33,8	86,9	98,8	10,8
Regular	39,3	17,5	34,2	12,0	-12,9	-31,4
Ruim ou Péssimo	43,7	4,1	32,0	1,1	-26,8	-73,2

Fonte: CNT, 2019 (adaptado).

Em 2019, a CNT também comparou as rodovias em responsabilidade pública e concedida, possuindo como resultados a Tabela 2.2. As condições para a maioria dos pavimentos em gestões concedidas ficaram entre desgastado e perfeito, enquanto para aquelas de controle público, desgastado e com trincas.

Tabela 2.2 – Condição de Superfície do Pavimento

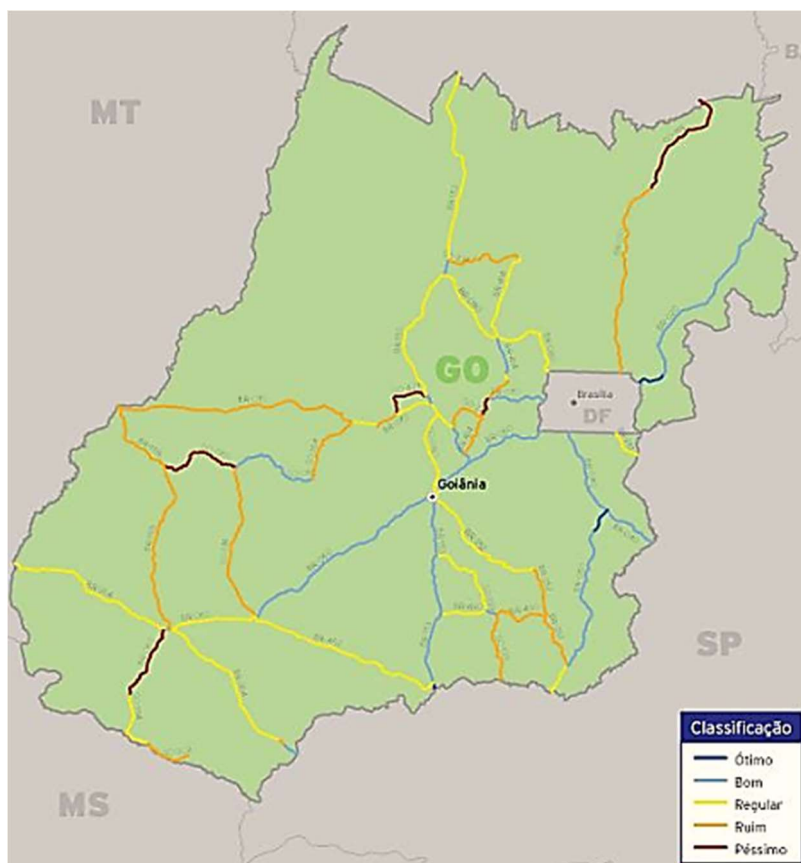
Condições das Superfície dos Pavimentos	Gestão Concedida		Gestão Pública	
	KM	%	KM	%
Perfeito	6.102	27,6	20.101	23,2
Desgastado	12.909	58,5	38.489	44,3
Trincado	2.850	12,9	22.049	25,4
Afundamentos	206	0,9	5.196	6,0
Destruído	12	0,1	949	1,1
Total	22.079	100,0	86.784	100,0

Fonte: CNT, 2019 (adaptado).

Em Goiás, 12.480 km estão sob responsabilidade do governo estadual, sendo que o estado possui um total de 87.860 km de rodovias. Em 2012, a CNT realizou uma avaliação da malha rodoviária brasileira e caracterizou as estradas goianas como:

1,4% em estado ótimo, 26,2% considerável boa, 38,8% regular, 8% ruim e 7,8% em péssima. Na Figura 2.2 a seguir são mostradas as rodovias pesquisadas pela CNT.

Figura 2.2– Classificação Geral das rodovias do estado de Goiás



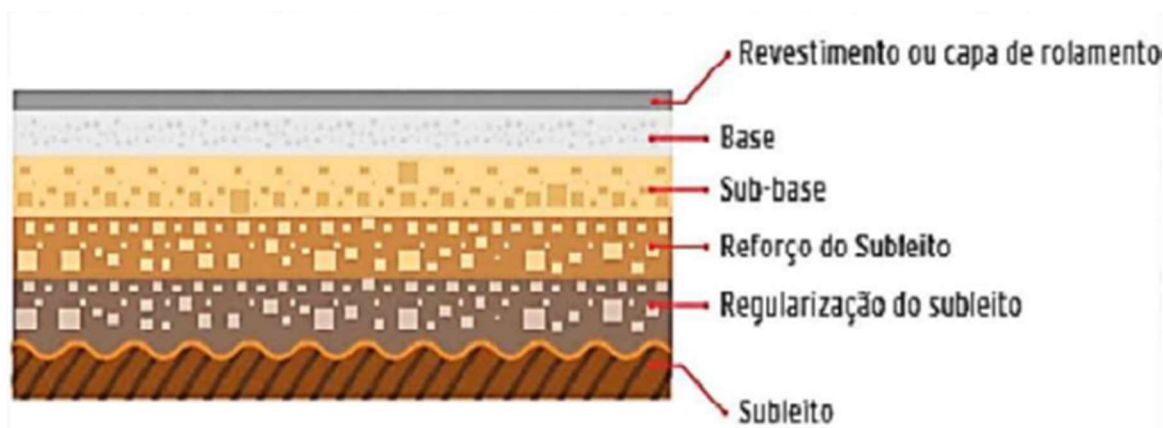
Fonte: CNT, 2012.

Identifica-se que a maioria das rodovias goianas estão em estado regular, e que poucas apresentam condições péssimas. Além disso, percebe-se a quantidade quase inexistente de malha rodoviária ótima.

2.2 ESTRUTURA DO PAVIMENTO RODOVIÁRIO

Os pavimentos possuem diversas camadas, sendo elas o subleito, a regularização, o reforço do subleito, a sub-base, a base e por fim, a capa de rolamento, como pode ser observado na Figura 2.3, onde cada uma delas possuem diferentes materiais. O revestimento asfáltico é a camada superficial de um pavimento e sofre diretamente com o contato das rodas e condições climáticas. É composto por ligante asfáltico e agregados, no qual essa mistura pode ocorrer diretamente na pista ou em uma usina.

Figura 2.3 – Esquema de seção transversal do pavimento flexível.



Fonte: CNT, 2017.

Cerca de 95% das rodovias pavimentadas brasileiras são de revestimento asfáltico. Esse componente é um ligante betuminoso derivado da destilação do petróleo com característica adesiva termoviscoplastico e impermeável. Além disso, esse elemento possui baixa reatividade, o que possibilita o envelhecimento por oxidação lenta com o contato com ar e água (BERNUCCI, *et al.*, 2010). No Brasil, é utilizado o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) para designar esse produto.

Segundo Bernucci, *et al.* (2010), no mercado brasileiro encontra-se os seguintes ligantes asfálticos: Asfaltos diluídos (ADP); Emulsões asfálticas (EAP); Asfaltos oxidados ou soprados de uso industrial; Cimentos asfálticos de petróleo (CAP); Asfaltos modificados por polímeros (AMP) ou por borracha de pneus (AMB); e Agentes rejuvenescedores (AR e ARE).

Outro componente do pavimento é o agregado, que pode ser areia, pedregulho, rochas, agregados artificiais (geralmente inertes) e reciclados. Essa variedade é alta, são divididos em três grupos, segundo sua natureza, tamanho e distribuição dos grãos. Quando utilizados para construção de bases e sub-bases estes são compostos por solos, britas de rochas, escória de alto forno ou pela mistura desses materiais (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Ainda de acordo com Bernucci *et al.*, (2010), os agregados devem ter propriedades que suportem as tensões do pavimento. O desempenho do agregado está relacionado ao modo como estes estão unidos, isso explica o uso dos ligantes asfálticos. As

camadas de base e sub-base devem possuir essa característica, sendo uniformemente granulares e flexíveis.

A base, sub-base e o subleito são compostos por materiais granulares, solos ou a mistura de ambos, sendo que seu objetivo é distribuir os esforços verticais na fundação. As bases e sub-bases formadas com esses materiais estão fortemente ligadas a resistência de esforços de compressão, possuindo baixa resistência a tração. Essas camadas podem ser estabilizadas granulometricamente com ligante asfáltico.

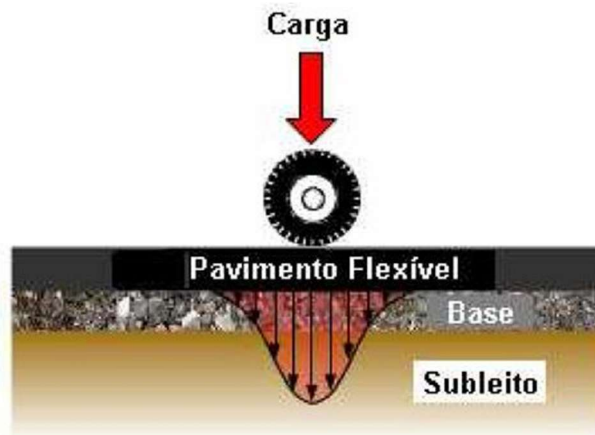
Como o ligante asfáltico é derivado de petróleo, na década de 70, com a crise do elemento, a reciclagem de pavimentos se expandiu pelo mundo, já que havia a necessidade da restauração dos pavimentos e os preços estavam exorbitantes. Atualmente, a tecnologia compete com vantagens em países de primeiro mundo.

No Brasil, as primeiras obras de reciclagem ocorreram em São Paulo na década de 80. A primeira obra significativa ocorreu em trechos da Via Anhanguera, entre São Paulo e Campinas, com um total de 90 km de via realizado pela DERSA-SP. Naquela época, o método de reciclagem utilizado foi o da fresagem, que atualmente é bastante utilizado no Brasil, principalmente em recuperação de grandes volumes. Já a utilização de resíduos reciclados cresceu com menor frequência, porém vem aumentando nos últimos anos no país (ARAÚJO, 2004).

2.2.1 Subleito

O subleito é o terreno onde é executada a fundação do pavimento por meio da compactação ou substituição do material natural para aumentar a sua rigidez, com o objetivo de evitar as deformações do solo, sendo uma das camadas que recebe os esforços verticais provenientes do tráfego, como pode ser observado na Figura 2.4.

Figura 2.4 - Carga verticalmente aplicada no subleito



Fonte: Araújo, (2016).

2.2.2 Regularização

Segundo o DNIT (2006), a regularização não é especificamente uma camada, sendo construída em cima do subleito para realizar o nivelamento transversal e longitudinal do terreno corrigindo possíveis falhas e determinando a inclinação transversal do pavimento, não sendo necessário à sua execução por toda a extensão da via, e sim apenas em trechos em que o subleito é irregular. Ela pode ser feita com o próprio resíduo do subleito originário do corte do terreno ou material de um local próximo que atenda as especificações.

2.2.3 Reforço do Subleito

O reforço do subleito é uma camada construída acima da regularização, com características melhores que das anteriores e geralmente é composta por um solo que apresenta uma boa resistência, pelo fato de receber e absorver cargas transmitidas pelas camadas que ficam acima.

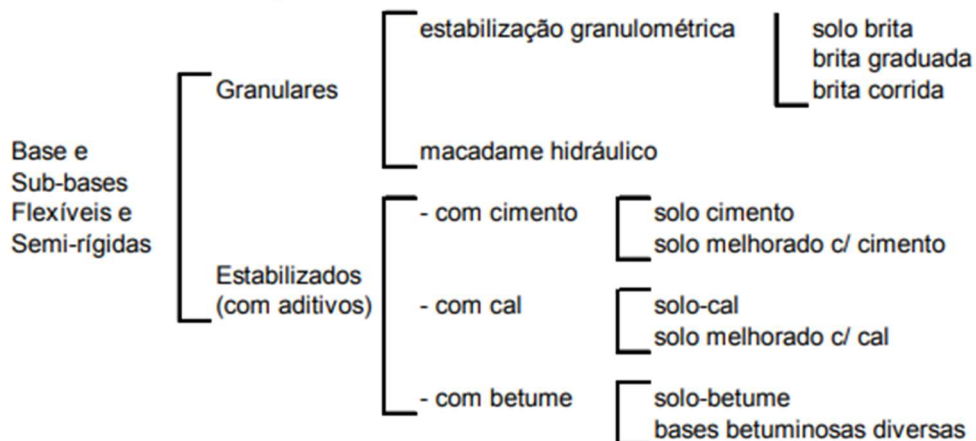
Segundo Senço (2007), as camadas de “reforço do subleito”, quando construídas, são geralmente constituídas de materiais menos nobres, isto é, são granulares e flexíveis, e quando há seleção de materiais na terraplenagem, não há necessidade da camada de reforço.

2.2.4 Sub-base

A sub-base é composta por materiais granulares, solos ou misturas entre esses dois e o seu principal objetivo é restituir e distribuir as cargas verticais à fundação, atuando também na drenagem do pavimento. Torna-se necessária quando a camada de base possui uma espessura excessiva para resistir aos carregamentos, sendo viável economicamente separá-la em duas. A camada por baixo (sub-base) é constituída pelos mesmos materiais que a base, porém as exigências técnicas são menores.

Os materiais que constituem a sub-base do pavimento flexível, podem ser estabilizados granulometricamente, onde ocorre a compactação da mistura de materiais com granulometria e índices geotécnicos específicos. Existe também o macadame hidráulico, que é uma estabilização onde ocorre a distribuição de agregados graúdos que, após a compactação, tem seus vazios preenchidos por agregados miúdos e a penetração desse material de enchimento é realizada com o auxílio de água. O macadame seco se diferencia do hidráulico pela granulometria e pela não utilização de água. A Figura 2.5 apresenta como as camadas de base e sub-base podem ser classificadas de acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006).

Figura 2.5 – Classificação da base e sub-base



Fonte: DNIT, 2006.

2.2.5 Base

A base é a camada que fica abaixo do revestimento, sendo assim sua função é resistir as cargas provenientes do tráfego de veículos no pavimento e as transferir para o subleito. Esta camada necessita de uma alta qualidade para desempenhar sua função de maneira adequada, sendo importante dentro do conjunto e tem exigências de compactação elevadas, o que torna necessário uma execução em obra com precisão. A partir da qualidade da base, ou tipo de pavimento, poderá optar por dispensar ou não as camadas de sub-base e o reforço do subleito.

2.2.6 Revestimento

O revestimento é a camada mais nobre do pavimento também chamada de rolamento, recebendo diretamente as cargas geradas pelo tráfego de veículos, tem como objetivo proporcionar condições de conforto, garantindo a segurança. Deve possuir resistência aos desgastes gerados por intempéries e impermeabilidade, pois as camadas inferiores dependerão do revestimento para que infiltre o mínimo de água possível na estrutura.

Esta camada é composta por uma mistura de 90% a 95% de agregado mineral e de 5% a 10% de material asfáltico, sendo a primeira parcela responsável por resistir as cargas aplicadas e o desgaste gerado pelas mesmas. Já a segunda é o elemento aglutinante, que liga os agregados entre si, promovendo também a impermeabilidade da mistura. São essas particularidades que fazem o revestimento ser a camada mais nobre do pavimento e também a mais cara, sendo necessário ter cautela na composição da mistura devido a importância da camada.

3 PAVIMENTAÇÃO COM AGREGADO RECICLADO

3.1 PAVIMENTO SUSTENTÁVEL

O pavimento sustentável é classificado por Van Dam *et. al.* (2015) como aquele que atinge seus objetivos funcionais, além de atender necessidades humanas básicas, realizar uso efetivo de recursos e preservar e restaurar ecossistemas circundantes. Conforme Leite (2013), a sustentabilidade na pavimentação asfáltica é afetada por fatores como saúde, durabilidade, segurança, conforto, mudanças climáticas, normalização, contratos ecológicos e reciclagem, com o emprego de bioprodutos e materiais alternativos.

Gómez-Pablo (2017) afirma que apesar do custo relativamente baixo dos agregados, devido ao alto consumo necessário para a pavimentação, eles geram impactos significativos na sustentabilidade do pavimento. São causados danos ambientais pela extração dos agregados naturais de pedreiras, poços de areia e cascalho, além da energia consumida para realizar o transporte desses materiais e no processamento dos agregados para os fins de pavimentação. Atentando-se para a elevada quantidade de recursos consumidos, pesquisadores, empresas do ramo e órgãos governamentais têm avaliado a necessidade de práticas mais sustentáveis na construção de pavimentos, com aplicação de novos materiais e com soluções para destinação de resíduos de processos industriais.

Dessa forma, para construir um pavimento sustentável, a combinação de agregados e outros componentes com agregados provenientes de materiais reciclados ou resíduos sólidos, além de ser uma alternativa economicamente viável, contribui para a redução do descarte de resíduos e redução gradual do consumo de recursos naturais. As misturas asfálticas mornas, reciclagem de pavimentos asfálticos, resíduos da construção e demolição (RCD), agregado de concreto reciclado e resíduos de processos industriais estão entre os exemplos de pavimentos com características sustentáveis.

3.2 MATERIAIS RECICLÁVEIS UTILIZADOS NA PAVIMENTAÇÃO

De acordo com o “*National Cooperative Highway Research Program*” (NCHRP, 2011), os resultados das reciclagens em pavimentos devidamente projetadas têm sido positivos, tanto para misturas de novos materiais quanto, para misturas com materiais reciclados. São benefícios da reciclagem:

- Redução do custo da construção;
- Conservação do meio ambiente e de recursos não renováveis;
- Possível melhoria nas propriedades físicas.

Além disso, a fonte renovável auxilia positivamente no número de empregos e impulsiona as atividades econômicas no mundo.

3.2.1 Resíduos de construção civil

Resíduos reutilizáveis da construção civil são aqueles provenientes de construções, reformas ou demolições que contém cerâmica, concreto, tijolo, rocha, telha e outros, desde que não tenham a presença de solos, vidros, plásticos, gessos ou outros materiais orgânicos (CONAMA nº 307, 2002). Em 2004, foi publicado no Brasil a norma da ABNT NBR 15.115, que especifica a utilização de resíduos da construção civil em camadas de base, sub-base e reforço do subleito dos pavimentos com base na resolução do CONAMA nº 307, de 2002.

De acordo com a ABRECON - Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (2019), são produzidos no Brasil cerca de 290,5 toneladas de entulho diariamente, onde apenas 21% são reciclados. Além disso, muitas cidades ainda não possuem um sistema para gerenciar esses resíduos de acordo com o solicitado pela Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente.

Ainda com relação a resolução CONAMA nº 307 (2002), os resíduos são caracterizados em 4 classes, sendo elas:

- Classe A: são aqueles reutilizáveis ou recicláveis como agregados, oriundos de construções, demolições, reformas, reparos de pavimentos entre outros;

- Classe B: são os resíduos recicláveis destinados a outras funções, sendo eles derivados de plásticos, papel, papelão, vidros entre outros;
- Classe C: são aqueles em que ainda não existem tecnologias que permitam sua reutilização, como o gesso;
- Classe D: são os produtos perigosos oriundos da construção, como: tintas, solventes, produtos radiológicos entre outros.

Para utilização dos resíduos na pavimentação, eles devem ser de classe A e devem sofrer um processo de reciclagem que origina um novo produto, denominado agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil. Essa transformação acontece normalmente em usinas recicladoras que são semelhantes as usinas de britagem convencional, utilizando os mesmos equipamentos para produção de agregados naturais incluindo a etapa de limpeza e seleção dos materiais.

No processo de reciclagem, os resíduos são pré-selecionados e passam por uma fase de catação, onde são descartados os materiais que não se encaixam a classe. Para materiais magnéticos e pequenos, é utilizado sistemas que fazem a separação diretamente nas correias transportadoras. Por fim, os resíduos passam por uma britagem para reduzir o seu tamanho e se tornar um agregado.

A viabilidade dos produtos oriundos da construção vem sido provada nas últimas décadas em camadas de base e sub-base de pavimentos. O uso desse material é uma alternativa interessante para substituir os materiais não renováveis, principalmente para as vias brasileiras que ainda não foram pavimentadas.

Além da reciclagem nas usinas, pode ocorrer também na própria obra, onde a britagem, é obtida através de um equipamento denominado britador de mandíbula e que está representado na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Britador de Mandíbula



Fonte: Furlan.

A qualificação dos resíduos é um processo necessário para identificar seu melhor destino. Na utilização dos materiais recicláveis vários aspectos devem ser analisados, pois suas características físicas são muito diferentes dos agregados naturais e devido a essas diferenças, é importante conhecer as especificações e normas, procurando seguir os limites estabelecidos.

Leite (2007), em seu estudo sobre o comportamento mecânico de Agregado Reciclado de Resíduo Sólido da Construção Civil em camadas de base e sub-base de pavimentos, observou que o material é do tipo misto e que mais de 50% do total era cimento. Além disso, também obteve como resultado que o agregado utilizado em camadas de sub-base é uma boa alternativa e que garante uma redução da deformabilidade da estrutura quando bem compactado. Já para as camadas de base, informou que o tráfego deve ser conhecido e era aconselhável a verificação da deformação permanente para as condições em campo.

3.2.2 Borracha de pneus

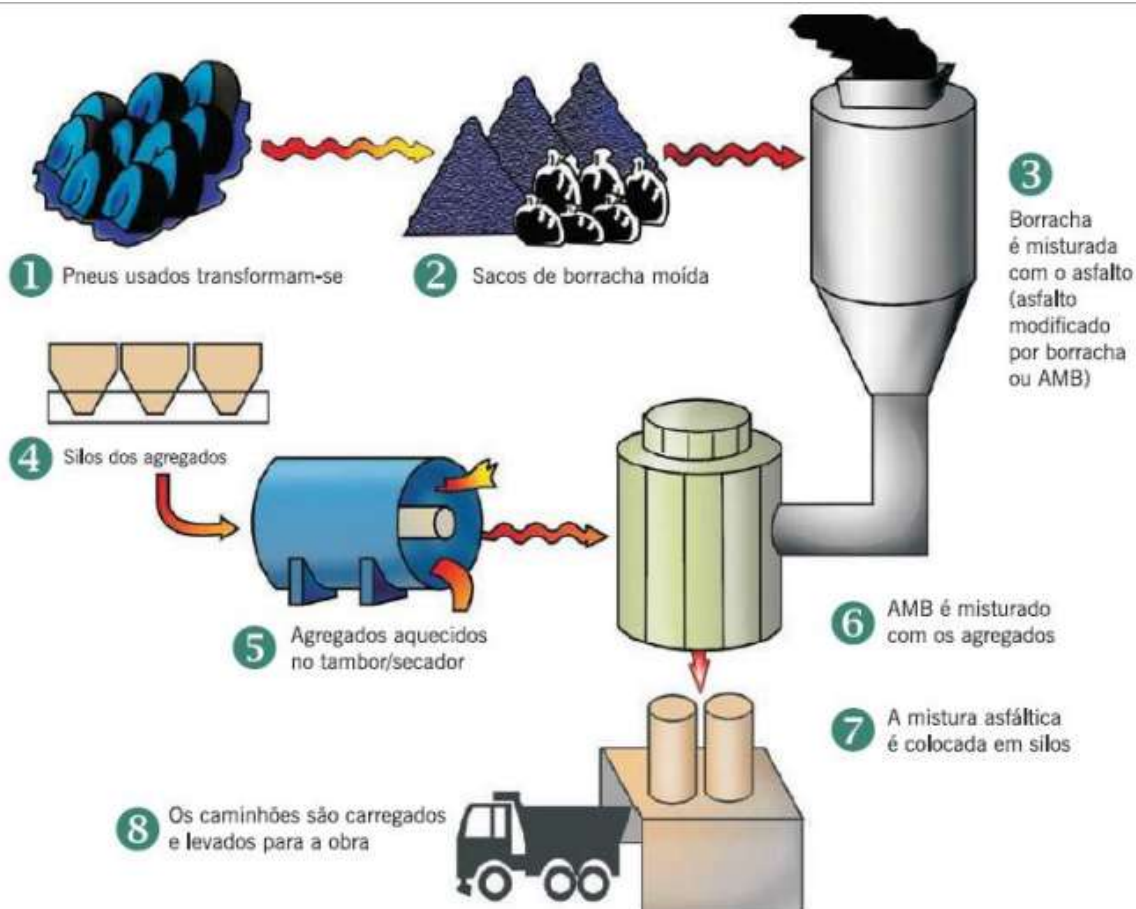
De acordo com Bernucci, *et. al.*, (2010), a utilização dos pneus inutilizados na pavimentação é uma solução para a sociedade já que eles não são tratados pela coleta de lixo convencional e são considerados resíduos especiais. O material tem sido utilizado para reciclagem de pavimentos, com a vantagem de melhorias nas misturas asfálticas sob vários aspectos. Essa mistura da borracha no asfalto reduz problemas ambientais e gera benefícios de um polímero ao ligante, pois o mesmo quando substituído por borracha torna a mistura asfáltica mais resistente e durável.

A borracha de um pneu de um veículo de passeio após sofrer o processo de reciclagem, gera de 4 a 5 kg de agregado reciclado, nesse processo, os componentes são separados e a borracha passa por reduções granulométricas finas, que posteriormente, podem ser utilizadas na modificação de asfaltos para pavimentação. O asfalto-borracha quando inserido em um quilômetro utiliza-se cerca de 500 pneus.

O processo de incorporação da borracha nas misturas asfálticas pode ocorrer de duas maneiras, a primeira é o método úmido, onde ela é incorporada antes que o ligante seja adicionado ao agregado. A norma que regula esse sistema é a DNIT 111/2009 e informa que o asfalto deve conter 15% de teor mínimo de borracha. Já o segundo método é o seco, onde a borracha atua como agregado miúdo.

No Brasil, de acordo com a Lei Nº 12.305, de 2 de Agosto de 2010, os pneus são considerados produtos de logística reversa, isso significa que os fabricantes devem realizar um reaproveitamento deles, o que justifica a reutilização em grande quantidade no país. A Figura 3.2 apresenta o esquema da fabricação da mistura asfáltica com a borracha, que é um dos métodos mais utilizados para reciclagem dos pneus.

Figura 3.2 - Esquema da fabricação da mistura asfáltica com asfalto-borracha pelo processo de via úmida



Fonte: BERNUCCI, *et al.*, 2010.

Uma das desvantagens dessa reciclagem é a emissão de SO^2 (dióxido de enxofre). Além disso o asfalto produzido com borracha custa cerca de 8% a mais que o convencional, mas também existem vantagens como o aumento de 50% da vida útil, redução na espessura da camada de revestimento e consequentemente a utilização de recursos. O processo também garante mais segurança e conforto aos usuários que percebem a diminuição de ruídos, a maior aderência dos pneus e a menor dispersão de água.

Conclui-se então que o asfalto reciclável é viável pelo ponto de vista econômico. Além disso, agregar a borracha nesse processo resulta em um ligante mais maleável e com maior sensibilidade térmica, o que possibilita uma melhora no pavimento e torna essa aplicação atraente.

Coelho (2019) verificou a preparação, caracterização e aplicação de Asfalto Modificado por Madeira/Borracha e observou como resultado que a inclusão do composto de pneu não compromete o desempenho dos pavimentos, e que melhora as propriedades mecânicas, o que torna promissor o seu uso seco em misturas asfálticas, ou seja, inserido como agregado em asfaltos.

3.2.3 Resíduos de pavimento

Reutilizar pavimentos deteriorados após um tratamento reduz o consumo de materiais utilizados na constituição convencional do pavimento. Esse método é uma maneira de reciclar e pode ocorrer com a camada total ou parcial, onde é realizada uma nova mistura com adição de novos materiais, conseguindo reaplicar a camada com diferentes condições. O pavimento reciclado pode ser utilizado com agregado e é geralmente mais rígido e mais quebradiço do que o asfalto novo devido a sua utilização e vida útil.

Os pavimentos asfálticos que podem ser recicláveis são considerados sustentáveis e possuem um ciclo de vida prolongado devido à adequadas operações de manutenção e relacionando o fim da vida útil com a produção de um novo material. Na Figura 3.3 é demonstrado como ocorre esse ciclo dos pavimentos.

Figura 3.3 – Ciclo de vida do pavimento



Fonte: VAN DAM, *et al.*, 2015.

As fases do ciclo de vida possuem uma importância igual a cada etapa e é considerado fechado, pois engloba a reutilização dos recursos após o fim. São vantagens desse tipo de reciclagem:

- Redução dos custos;
- Conservação de agregados e ligantes;
- Preservação da geometria do pavimento existente;
- Preservação do meio ambiente;
- Conservação de energia;
- Rápida liberação da pista.

A reciclagem dos pavimentos rodoviários pode ocorrer em usinas, de maneira quente ou fria, ou in situ, que é a modificação no local da construção. Na criação da nova mistura pode ser adicionado materiais como: agregados, cimento Portland, espuma de asfalto, cimento asfáltico de petróleo entre outros, onde a quantidade irá variar de acordo com as características procuradas.

Existem cinco categorias diferentes para reciclagem, sendo elas:

- Reciclagem a frio: é o processo de reciclagem onde não ocorre aplicação de calor, ou seja, é feito na temperatura ambiente;
- Reciclagem a quente: é o processo onde remove-se a estrutura pela fresagem a frio e é transportada para uma usina de asfalto fixa para ser misturada com novos agregados e asfalto quente, chegando a uma mistura reciclada;
- Reciclagem a quente in situ: nesse esquema, o pavimento existente é aquecido e amolecido, permitindo que seja escarificada com uma rotativa quente à profundidade entre 0 e 75 mm. Esse pavimento é cuidadosamente misturado e depois aplicado e compactado com o equipamento de pavimentação a quente;
- Reciclagem a frio in situ: feita na temperatura ambiente, é a técnica de reabilitação do pavimento com reaproveitamento da camada podendo ter acréscimo de agregados e agentes emulsionados, com o intuito de se obter uma mistura homogênea e de acordo com os requisitos exigidos;

- Reciclagem profunda: é a reconstrução total do pavimento onde a recuperação ocorre através da junção da espessura total do pavimento e de uma porção da base, pulverizando e misturando uniformemente para produzir um material de base homogênea melhorada.

O pavimento reciclado é feito primeiramente removendo as camadas compactadas, após isso são adicionados os agregados com a finalidade de corrigir a granulometria do material e por fim, acontece a regeneração entre os materiais da camada na mistura final adicionando um agente rejuvenescedor, que pode ser um polímero, betume ou aditivo.

O primeiro passo dessa reciclagem é o corte dos pavimentos feito através de uma máquina denominada fresadora. Independentemente do método utilizado, o material deve ficar com o tamanho granulométrico adequado. Na Figura 3.4 é apresentado como deve ser o aspecto deste resíduo.

Figura 3.4 – Aspecto do material fresado de revestimento asfáltico



Fonte: DAVID, 2006.

Como a utilização desse material substitui o uso de agregados, esse método de reciclagem acaba reduzindo os custos da construção, além do benefício ambiental, o que possibilita que os órgãos rodoviários realizem maiores atividades de acordo com o orçamento estimado, e que aumente a utilização dessa técnica no país.

Hómez (2014), em seu estudo sobre as rodovias goianas restauradas com a técnica de reciclagem a frio *In Situ* verificou que a técnica é uma boa opção, mas que se não forem pensadas soluções de projeto consistentes e realizados controles executivos na implantação das soluções adotadas, a durabilidade dessas obras pode ficar comprometida.

3.2.4 Resíduos de madeira

Em 2016, o Brasil cultivou cerca de 7,84 milhões de hectares de árvores com fins de processamento industrial (LOUZADA JUNIOR *et al.*, 2017). Essa produção resulta em um acúmulo de resíduos de vários tamanhos e formas através de atividades florestais ou industriais. Devido à alta produção desses resíduos, é necessário encontrar alternativas sustentáveis para sua destinação reduzindo os impactos e o número de aterros. Na Figura 3.5 é possível identificar as possíveis formas de localizar esse material.

Figura 3.5 – Diversos tipos de resíduos da madeira



Fonte: Revista Saúde e Meio Ambiente, 2017.

Em indústrias, a madeira é utilizada como fonte de energia através de sua queima. Durante a combustão incompleta é originado a cinza da madeira, que na sua maioria, é destinada a aterros (BENNACK, 2016). A cinza, diferentemente dos outros materiais recicláveis utilizados na pavimentação, não precisa de nenhum processo de beneficiamento antes de ser utilizada como adição.

Esse material pode ser utilizado para substituir os convencionais em indústrias de cimento, ou em substituição do agregado miúdo. Além disso, dependendo da sua composição química, pode ainda substituir parcialmente o cimento. A cinza da

madeira influencia na quantidade de água, trabalhabilidade, densidade, porosidade, absorção e resistência do pavimento.

Com a adição de um estabilizante como a cal, existe um melhor comportamento mecânico das misturas do solo-cinza com o pavimento e por isso, esse material oferece um benefício significativo para as camadas de base e sub-base, se tornando uma solução eficaz para o destino desses resíduos.

Grando (2019) avaliou as propriedades do ligante asfáltico 50-70 modificado com cinza de resíduos de madeira e constatou que o asfalto teria um aumento da rigidez e portanto haveria uma diminuição da resistência ao trincamento por fadiga e que o uso da cinza não compromete a durabilidade do ligante asfáltico.

Farias (2005) analisou o uso de misturas de solo/cinza pesada na pavimentação e verificou que o uso dos materiais aplicados individualmente não atende as especificações, porém quando são misturados e estabilizados com cal, apresentam melhora significativa, podendo ser aplicados em camadas de sub-base de pavimentos flexíveis.

3.3 PAVIMENTAÇÃO COM AGREGADO RECICLADO NO MUNDO

A viabilidade do emprego de materiais reciclados de resíduos da construção civil no pavimento foi verificada por meio de pesquisas no Reino Unido no início da década de 90, pois o consumo de materiais de construção vinha aumentando, o que no futuro poderia acarretar na falta dos insumos das reservas naturais. Estas pesquisas verificaram as propriedades dos resíduos de alvenaria e concreto britados para comporem as camadas de base e sub-base. Foram analisadas também os materiais convencionalmente utilizados nessas camadas para serem a referência comparativa.

A partir dos ensaios realizados de Índice de Suporte Califórnia, foi verificado que os resíduos de concreto apresentavam comportamento semelhante ao da brita calcária, diferente dos resíduos de alvenaria que apresentaram uma capacidade menor de suporte. Todas as amostras que foram analisadas apresentaram uma porcentagem superior a 30% do Índice de Suporte Califórnia.

Desde 1997, muitos estados americanos começaram a implantar resíduos de concreto reciclado na construção de pavimentos, pois tem sido um excelente material para substituir a brita calcária nas camadas de base e sub-base, com uma boa capacidade de suporte, drenagem e durabilidade. Para a reutilização desses materiais no pavimento, nos Estados Unidos foram realizados alguns ensaios laboratoriais para determinar o módulo de resiliência e deformação permanente, utilizando diferentes porcentagens de agregados reciclados misturados com a brita graduada. Ao fim dos ensaios os resultados foram positivos quanto aos módulos de resiliência que foram superiores ao da brita graduada, no entanto apresentou uma deformação permanente maior.

Ainda nos Estados Unidos, no estado de Nova Jersey, o agregado reciclado foi implantado na execução de pavimento rígido como base e sub-base. As amostras de agregados reciclados de concreto e as misturas de agregados reciclados com brita graduada apresentaram um módulo de resiliência superior ao da brita usualmente usada.

Na China, na cidade de Xi'na, após ser elaborado o projeto da rodovia Sanhuan, foi feito um estudo para verificar a viabilidade da implantação de resíduos de demolição. Como resultado obteve que o resíduo analisado possuía alta resistência e estabilidade recomendada, sendo assim a solução foi adotada na execução da via, pois obteve um resultado que atendia aos pré-requisitos do projeto (LI *et al.*, 2017)

Na Espanha, o agregado graúdo foi substituído por agregados reciclados de resíduos da construção civil na execução de pavimentos flexíveis e obteve resultados positivos no âmbito da economia e na redução dos impactos socioambientais que eram causados pelos resíduos.

3.4 PAVIMENTAÇÃO COM AGREGADO RECICLADO NO BRASIL

Em 1984 foi pavimentada a primeira via de São Paulo com a utilização de agregados reciclados provenientes da construção civil na camada de reforço do subleito e apresentou desempenho satisfatório na época. O seu desenvolvimento foi acompanhado pelo IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo)

que, em parceria com a Prefeitura, projetou a Rua Gervásio de Costa, localizado na região oeste da cidade, para receber um volume baixo de tráfego (MOTTA, 2005).

Com isso na década seguinte na cidade de São Paulo foi introduzido um programa de reciclagem de resíduos provenientes da construção civil com o intuito de comporem a pavimentação. Na cidade de São Carlos funciona uma usina de triagem e reciclagem de resíduos da construção civil desde 2005, cujo objetivo é diminuir os depósitos irregulares em áreas verdes e córregos, fornecendo esses agregados reciclados para uso na camada de sub-base e pisos intertravados em obras de pavimentação. Essa opção de pavimento foi implantada em algumas ruas do Bairro Santa Angelina, utilizando os resíduos como agregado da sub-base do pavimento.

Na cidade de Belo Horizonte são construídos pavimentos utilizando agregados reciclados provenientes da construção civil nas camadas de reforço do subleito, sub-base e base desde 1996, baseando-se em dimensionamentos empíricos, através de cálculos levando em consideração o Índice de Suporte Califórnia. Várias vias da cidade são compostas por agregados reciclados podendo ser citadas as avenidas Raja Gabaglia e Mário Werneck. Estes são produzidos pela própria prefeitura e provenientes de estações de reciclagem de resíduos da construção civil, os pavimentos possuem condições de tráfego semelhantes as vias convencionais.

Em Goiânia, no final de 2003, foi construída uma através de uma parceria entre a Prefeitura de Goiânia, a Universidade de Brasília, Universidade Federal de Goiás e empresas da região, uma pista experimental na Rua Ciprestes, utilizando nas camadas de base e sub-base uma mistura de agregados reciclados de construção e demolição com um solo argiloso retirado do próprio local.

A pista experimental possuía um comprimento de 100 metros, sendo cerca 50 metros construídos com o agregado reciclado. Na Tabela 3.1 são apresentados alguns aspectos da pista. Os resíduos utilizados na construção foram processados em três frações granulométricas, foram denominadas de brita 19mm, brita 9,5mm e areia. Na Figura 3.6 podem ser observados alguns aspectos construtivos da pista. Essa foi liberada em 2004 para tráfego e com isso o monitoramento de campo foi iniciado, onde foram realizadas medidas de deflexão com a viga Benkelman e de penetração

com o penetrômetro dinâmico de cone, assim como também ensaios pressiométricos e de prova de carga.

Tabela 3.1 - Características da pista experimental de Goiânia

CAMADA	ENERGIA DE COMPACTAÇÃO	ESPESSURA (cm)	COMPOSIÇÃO
Revestimento	-	5	CBUQ
Base	Intermediária	15	25% de brita 19mm, 25% de brita 9,5mm, 25% de areia e 25% de argila
Sub-base	Intermediária	15	33% de brita 19mm, 33% de brita 9,5mm, 17% de areia e 17% de argila

Fonte: Mendes, 2004 (Adaptado).

Figura 3.6 - Detalhes construtivos da execução da pista



Fonte: Oliveira, 2007.

Segundo Oliveira (2007), após dois anos e nove meses de tráfego, a pista experimental não apresentava defeitos superficiais aparentes, nem deformações que

comprometiam a estrutura, apresentando um bom resultado o qual indica que os agregados reciclados de resíduos da construção civil podem ser utilizados nas camadas de base e sub-base do pavimento.

3.5 CINZAS DE MADEIRA NA PAVIMENTAÇÃO

A queima de madeira para geração de energia em caldeiras produz como resíduo a cinza, devido à combustão incompleta da madeira quando utilizada para esse fim. As cinzas são, em geral, constituídas de minerais oxidados, areia e carbono orgânico e a quantidade gerada está ligada à qualidade das madeiras, a eficiência das caldeiras e dos filtros de retenção dessas cinzas. Em caldeiras pouco eficientes, a taxa residual de carbono é alta, chegando a 40%, o que significa maior geração de cinzas como resíduo sólido (FOELKEL, 2011). As milhares de toneladas de cinzas produzidas geralmente são destinadas aos aterros, sem utilização sustentável.

Foelkel (2011) afirma ainda sobre a possibilidade de utilização das cinzas na pavimentação de estradas em misturas como solo/cal e solo/cimento, mas também na pavimentação asfáltica, com utilização parcial em substituição à areia para agregados finos. Por precaução, a utilização é limitada em 10% a 20% para manter as especificações de qualidade e segurança exigida nos pavimentos. A reciclagem do material, mesmo em baixas proporções, contribui para a redução de descarte de resíduos e a preservação dos agregados comumente utilizados.

Para Achy (2018), a utilização da cinza de madeira incorporada a produtos cimentícios, é uma alternativa para reduzir o impacto ambiental causado pela geração das cinzas, e uma alternativa econômica para o consumo significativo de matéria-prima para cimentícios. Em seu estudo, na adição de cinzas de madeira com porcentagens maiores que 5% no concreto, ocorreu aumento na absorção e porosidade aberta do concreto, pois as cinzas absorvem mais água que a areia média. Porém, em baixas porcentagens apresenta resultados satisfatórios como agregado miúdo, influenciando diretamente no comportamento mecânico do concreto compactado com rolo para a camada de sub-base de pavimentos rígidos.

Barros e Mello (2017) avaliou o uso da cinza de Pinus como filler no Concreto Asfáltico Flexível (CAP). O resíduo não apresentou melhorias na mistura asfáltica e não proporcionou mudanças favoráveis, pois não obteve boa interação com o ligante. Além disso, ocorreu aumento no consumo de CAP devido à baixa massa específica das cinzas. Contudo, o resíduo é tecnicamente viável para utilização, pois apresenta ganhos a longo prazo quando observados os benefícios ambientais gerados pela redução do descarte das cinzas.

Parte das pesquisas realizadas no Brasil com uso das cinzas de madeira aplicadas à pavimentação são referentes a utilização desse material como adição mineral ao concreto compactado com rolo ou como filler no concreto asfáltico flexível. Assim, tendo em vista a inexpressiva literatura referente a utilização desse resíduo, esse trabalho tem o propósito de realizar esse estudo e analisar a viabilidade desse material no pavimento flexível.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

O resíduo (cinza de madeira) utilizado nos ensaios é gerado a partir da combustão de cavacos de eucalipto e foi gentilmente cedido pela empresa Lasa Soja e Álcool, localizada na cidade de Ipameri-GO, e é apresentado na Figura 4.1.

Figura 4.1 - Cinzas do cavaco de Eucalipto



Fonte: Autoras, 2021.

4.2 MÉTODOS

Para melhor identificar as características da cinza da madeira ao ser usada como material para pavimentação e analisar as propriedades físicas e mecânicas quando comparadas aos materiais ordinariamente utilizados em base e sub-base de pavimentos, ensaios laboratoriais foram realizados. Para a caracterização do material serão efetivados ensaios de Massa Específica, Teor de umidade e Granulometria. Para análise física, o ensaio de Limite de Liquidez e Plasticidade. Já para análise mecânica, serão realizados experimentos laboratoriais de Compactação (Proctor).

4.2.1 Massa específica

A massa específica é a relação entre a massa do solo e seu volume, eliminando seus poros permeáveis, tendo também a massa específica aparente onde os poros

permeáveis são incluídos. Os ensaios foram realizados conforme a norma ABNT NBR 6458 (2016) - Anexo B.

Para a realização desse ensaio, utiliza-se como aparelhagem estufa, aparelho de dispersão com hélice metálicas, balão volumétrico, bomba à vácuo, termômetro graduado, balança, funil de vidro, pipeta, béquer de vidro e cápsulas.

Para a obtenção da massa específica conforme a Norma 6458 (2016), inicialmente são separadas duas amostras de 50 gramas cada e levadas a estufa para secagem por 24 horas a $\pm 105^{\circ}\text{C}$. Após retiradas da estufa, adiciona-se água destilada nas amostras para imersão (Figura 4.2 a) e depois são depositadas no copo do aparelho dispersor de amostras (Figura 4.2 b) e agitadas por 15 minutos cada. Em seguida, as amostras são totalmente transferidas para um balão volumétrico previamente pesado com auxílio de um funil (Figura 4.2 c) lavando o copo com água destilada para evitar perda de material, completa-se com água até a marcação existente e são acopladas à bomba de vácuo com mínimo de 88 kPa para que o ar existente seja retirado durante 15 minutos (Figura 4.2 d).

Após a retirada do vácuo, o balão fica em repouso e com auxílio de uma pipeta adiciona-se água destilada no balão volumétrico até a marca de referência e a parte externa e o gargalo são enxugados. Após o processo, é pesado o conjunto de balão volumétrico, água e material e, em seguida, com um termômetro, verifica-se a temperatura do conjunto.

Figura 4.2 – Realização de ensaio de Massa específica – NBR 6458 (2016)



(a) Adição de água destilada à amostra



(c) Transferência da amostra para balão volumétrico



(b) Amostra no aparelho de dispersão



(d) Aplicação de vácuo

Fonte: Autoras, 2021.

Por fim, os balões volumétricos são novamente pesados contendo apenas água. A massa específica é calculada através da equação 4.1:

$$\rho_s = \frac{M_1 \times 100 / (100 + w)}{M_1 \times \frac{100}{100 + w} - M_2 + M_3} \times \rho_w (T) \quad (4.1)$$

Onde:

ρ_s – massa específica dos grãos do solo, expressa em g/cm³;

M_1 – Massa do solo úmido, em grama;

M_2 – Massa do solo úmido + balão volumétrico + água, em temperatura ambiente, em grama;

M_3 – Massa do balão volumétrico até a marcação de referência, em grama;

w – umidade inicial da amostra, em porcentagem;

$\rho_w(T)$ – Massa específica da água, na temperatura do ensaio, obtida conforme Anexo I, em g/cm³.

Os resultados são considerados satisfatórios caso os valores calculados sejam de diferença menor que 0,02 g/cm³.

4.2.2 Teor de umidade

Este ensaio tem por objetivo determinar a umidade presente no material, e é utilizado como preparação para caracterização do material e auxiliar em outros ensaios. Inicialmente para sua realização é efetuado quarteamento do material. O ensaio foi realizado conforme a normativa ABNT NBR 6457 (2016) – Anexo A. Os materiais utilizados para realização foram uma balança, cápsula, estufa e peneira.

O material é peneirado na peneira 200 (0,075mm), como pode ser observado na Figura 4.3 (a), posteriormente são separadas três amostras em recipientes do material retido na peneira (Figura 4.3 b), e anotado os seus respectivos pesos, levando as amostras à estufa por 24h.

Figura 4.3 - Preparação para ensaio de teor de umidade



(a) Peneiramento do material



(b) Amostras para obtenção da umidade

Fonte: Autoras, 2021.

O teor de umidade é obtido através da equação 4.2:

$$w = \frac{M_1 - M_2}{M_2 - M_3} \times 100 \quad (4.2)$$

Onde:

w – Teor de Umidade, expresso em porcentagem (%);

M_1 – Massa do solo úmido mais massa da cápsula, em gramas (g);

M_2 – Massa do solo seco mais massa da cápsula, em gramas (g);

M_3 – Massa da cápsula, em gramas (g);

4.2.3 Granulometria

Através do ensaio de granulometria é determinado o módulo de finura e a dimensão máxima característica do material apresentada pela curva granulométrica do material. Essa técnica consiste na distribuição em porcentagem, dos tamanhos dos grãos, determinando as dimensões das partículas e as porcentagens de suas ocorrências. O ensaio é realizado de acordo com a ABNT NBR 7181 (2016).

Os materiais utilizados na pesquisa são: estufa capaz de manter entre 60° e 65° C e entre 105° e 110° C, balanças, cápsulas, aparelho de dispersão, peneiras, escovas com cerdas metálicas e, se possível, um agitador mecânico.

Para execução do ensaio, inicialmente é realizado o quarteamento do material, demonstrado na Figura 4.4 (a) e em seguida são separadas 120 gramas para ser levado a estufa (Figura 4.4 b) por no mínimo 24h para secagem. Após esse procedimento, realiza-se a limpeza das peneiras e o encaixamento na seguinte ordem: 9,5mm - 6,3mm - 4,75mm - 2,36mm - 1,18mm - 0,6mm - 0,3mm - 0,15mm, formando um único conjunto com fundo e tampa. A Figura 4.4 (c) ilustra as peneiras utilizadas no ensaio.

Figura 4.4 – Preparação para determinação da granulometria.



(a) Quarteamento do material



(b) Estufa utilizada para secagem do material



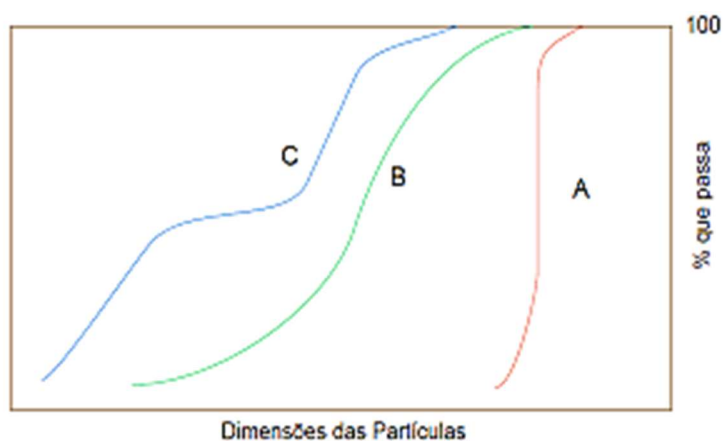
(c) Conjunto de peneiras utilizadas na determinação da granulometria

Fonte: Autoras, 2021.

A amostra quando depositada no conjunto de peneiras passa por agitação por cerca de 15 minutos. A peneira de maior abertura é retirada e o material passante é adicionado a peneira seguinte, esse processo se repete com todas as aberturas. O peso do material que passa em cada peneira é a porcentagem que atravessa as peneiras. O que fica retido em cada peneira, é pesado e a partir desses dados as curvas granulométricas são traçadas.

O resultado do ensaio é normalmente expresso por meio da curva granulométrica, onde no eixo das abcissas estão as dimensões das partículas, ou as aberturas das peneiras, e no eixo das ordenadas estão as porcentagens passantes acumuladas em cada peneira analisada. De acordo com o resultado da curva, é possível classificar o material como uniforme, bem graduado ou mal graduado. A classificação depende da ausência ou equilíbrio das frações grossas e finas por cálculo de índices que expressam a forma da curva. A Figura 4.5 apresenta um exemplo do traçado das curvas granulométricas.

Figura 4.5 – Dimensões das Partículas



Fonte: DNIT, 2006.

O módulo de finura pode ser calculado através da soma das porcentagens retidas acumuladas em cada peneira particionado por 100. Já o diâmetro máximo do agregado, é obtido em função da abertura da peneira em que a porcentagem retida acumulada for inferior a 5% e superior a 5% na peneira abaixo do conjunto de peneiras.

4.2.4 Limite de liquidez e plasticidade

O Limite de Liquidez corresponde ao menor teor de umidade com que uma amostra de um solo pode ser capaz de fluir e o ensaio de determinação é regido pela ABNT NBR 6459 (2016). O limite representa a transição do estado plástico ao estado líquido do material, representado por LL e expresso em porcentagem.

Para o ensaio de Limite de Liquidez são necessários os seguintes instrumentos: peneira número 40, estufa que mantenha a temperatura entre 105° e 110° C, balança,

aparelho de Casagrande, cápsula de 12 cm de diâmetro, funil de 5 cm de diâmetro e espátula de aço.

Utilizando 30 gramas do material passado na peneira 40, coloca-se o material numa cápsula, acrescentando de 15 a 20 cm³ de água destilada e misturando até resultar em uma massa plástica. Transfere-se essa massa para a concha do aparelho, como na Figura 4.6 (a), onde ela é moldada para que a parte central tenha uma espessura de 1 cm. Com o cinzel, divide-se a massa em duas partes, perpendicular à articulação da concha (Figura 4.6 b).

Figura 4.6 – Ensaio de Limite de Liquidez



(a) – Colocação do material no aparelho de Casagrande



(b) Material após divisão com cinzel

Fonte: Autoras, 2021.

Girando a manivela, devem ser processados golpes da concha contra a base do aparelho, a uma razão de duas voltas por segundo até que as bordas inferiores se unam em 1,3 cm de comprimento, sendo registrado o número de golpes. Onde a massa se uniu, é retirado um pedaço de material para que seja feita a determinação da umidade através da estufa. Essas operações repetem-se, colocando de 1 a 3 cm³ de água, até se obter 5 pontos.

Seu resultado é demonstrado através de uma curva (Curva de Fluidez), onde nas abscissas encontra-se os teores de umidades e nas ordenadas a quantidade de golpes. Esses pontos dão origem a uma reta, onde o ponto equivalente a 25 golpes determina o teor de umidade que é o limite de liquidez (LL).

Já o Limite de Plasticidade é o menor teor de umidade com o qual se consegue moldar um cilindro com 3 mm de diâmetro, rolando o solo com a palma da mão. Esse limite representa a transição do estado plástico ao estado semi-plástico do material e é representado por LP e expresso em porcentagem, com ensaio de determinação conforme a norma ABNT NBR 7180 (2016).

Para este ensaio são necessários os seguintes materiais: peneira número 40, estufa que mantenha a temperatura entre 105° e 110° C, balança, placa de vidro, cápsula de 12 cm de diâmetro, cilindro de comparação, pinça metálica e espátula de aço.

Utiliza-se 50 gramas do material passante da peneira 40, que são depositados na cápsula de porcelana e mistura-se água até se obter uma massa de consistência plástica (Figura 4.7) amassando e revolvendo a mistura de 15 a 30 minutos. Após tal procedimento, forma-se uma bola que deve ser rolada sobre a placa de vidro com pressão da palma da mão para que a massa fique com 3 mm de diâmetro por 10 cm de comprimento.

Figura 4.7 – Material preparado para ensaio de Limite de Plasticidade



Fonte: Autoras, 2021.

Essa operação é continuada até que por perda de umidade o cilindro se fragmente ao atingir as medidas desejadas. Quando ocorre a quebra desse cilindro deve-se transferir vários pedaços para um recipiente para a determinação da umidade em estufa. Essa operação é repetida até que se tenha no mínimo 3 valores para a

umidade. Os resultados das umidades separadamente não podem ser divergentes em mais de 5% da média aritmética dos resultados, que é o Limite de Plasticidade (LP).

4.2.5 Compactação (Proctor normal)

A compactação é um método de estabilização dos solos que se dá através da aplicação de energias como os impactos, as vibrações e as compressões. A compactação diminui o índice de vazios, a permeabilidade e a compressibilidade, mas também aumenta o peso específico e a resistência ao cisalhamento. Com este ensaio, é possível obter a correlação entre o teor de umidade e o peso específico seco de um solo compactado. O ensaio de Proctor Normal é realizado através da norma ABNT NBR 7182 (2016) com sucessivos impactos de soquete padronizado na amostra.

Para este ensaio são necessários os materiais: peneira número 4, balança, molde cilíndrico pequeno, com base e colarinho, soquete cilíndrico, provetas de vidro, extrator de corpo de prova, conchas metálicas, papel com diâmetro igual ao do molde, bandejas, régua, espátulas, estufa e cápsulas.

Inicialmente, o material sofre secagem prévia, em seguida é feito o destorroamento do material e logo após a separação de uma amostra pelo quarteamento. Após tal procedimento, passa-se o material na peneira de 4,8mm e com a porcentagem retida menor que 7%, utiliza-se o cilindro pequeno. Conforme a norma, devem ser utilizados 15 quilos de amostra, porém como o material em estudo tem característica de ser volumoso, usou-se apenas 500 gramas, como apresenta a Figura 4.8.

Figura 4.8 – Material utilizado para o ensaio – 500 gramas



Fonte: Autoras, 2021.

Após a preparação do material, identifica-se qual a energia de compactação a ser aplicada, podendo ser normal, intermediária e modificada. Para o ensaio, utilizou-se energia normal, com soquete pequeno e 3 camadas no cilindro pequeno.

Para o início do ensaio, deve-se fixar o molde cilíndrico à sua base, acoplar o complementar e apoiar o conjunto em base rígida, como mostra a Figura 4.9 (a). Além disso, coloca-se uma folha de papel com o mesmo diâmetro do molde no fundo, para evitar a aderência do material compactado com a superfície da base. Em seguida, adiciona-se água à amostra até obter uma mistura homogênea e consistente, como a Figura 4.9 (b).

Figura 4.9 – Preparação para ensaio de Compactação.



(a) Conjunto de cilindro pequeno fixado à base e acoplado com o complementar



(b) Amostra homogeneizada

Fonte: Autoras, 2021.

Compacta-se a massa no molde cilíndrico em 3 camadas iguais, aplicando em cada uma 26 golpes com o soquete caindo perpendicularmente na mistura, conforme Figura 4.10 (a). As 3 camadas devem ter alturas aproximadas e quando iniciado a nova camada, deve haver escarificação da subjacente. Após a compactação da última camada, retira-se o cilindro complementar depois de escarificar o material com uma espátula. Pode haver no máximo 10 milímetros de material compactado acima do molde, que devem ser retirados com a régua biselada, como demonstrado na Figura 4.10 (b).

Figura 4.10 – Compactação do material.



(a) Soquete caindo perpendicular ao cilindro



(b) Régua Biselada.

Fonte: Autoras, 2021.

Feito isso remove-se o cilindro da base, aplainando a superfície do material à altura do molde. Pesa-se o conjunto cilindro somado ao material compactado, para obter a massa úmida do material compactado, demonstrado na Figura 4.11 (a). Retira-se a amostra do molde com auxílio do extrator, como mostra a Figura 4.11 (b), e partindo-a ao meio, coleta-se uma quantidade para determinação da umidade.

Figura 4.11 – Remoção da amostra de compactação



(a) Pesagem material úmido + cilindro



(b) Extrator de amostra

Fonte: Autoras, 2021.

O processo é realizado 5 vezes adicionando água numa quantidade maior de 2% da massa original do material, em peso.

O gráfico de compactação é construído pela relação entre o teor de umidade (abscissas) e a massas específicas aparentes secas (ordenadas). O teor de umidade é obtido pela equação 4.2 e a massa específica aparente seca é dada pela equação 4.3:

$$\rho_d = \frac{M_U \times 100}{V (100 + w)} \quad (4.3)$$

Onde:

ρ_d é a massa específica aparente seca, em g/cm³;

M_U é massa úmida do material compactado, em g;

V é volume útil do molde cilindro, em cm³;

W é o teor de umidade do material compactado, em %.

5 ANÁLISE DE RESULTADOS

Os ensaios laboratoriais realizados têm como objetivo avaliar as características da cinza de madeira de eucalipto, proporcionando entendimento acerca do material e de seu comportamento. Neste capítulo, são apresentados todos os resultados obtidos a partir dos estudos realizados no laboratório de solos do Instituto Federal de Goiás – Campus Goiânia, entre os dias 04 de agosto e 04 de novembro de 2021.

5.1 MASSA ESPECÍFICA

O ensaio de massa específica foi realizado conforme a norma ABNT NBR 6458 (2016) - Anexo B, utilizando-se duas amostras, conforme informações apresentadas na Tabela 5.1 abaixo:

Tabela 5.1 - Dados obtidos para determinação de massa específica

Balão Volumétrico	Nº	03	05
Massa do Balão volumétrico vazio	g	179,66	182,46
Massa do Material Úmido (M)	g	50,00	50,00
Umidade Higroscópica (w_{hig})	%	4,06	4,06
Massa do Material Seco (M_s)	g	48,05	48,05
Massa do balão + Material + água complementar	g	706,81	708,86
Massa do balão + água total	g	676,49	679,06
Temperatura medida	°C	25,3	25,4
M. Específica água à temp. medida (p_w)	cm ³	0,997	0,997

Fonte: Autoras, 2021.

A partir dos valores obtidos, calculou-se a massa específica dos grãos conforme a Tabela 5.2 abaixo:

Tabela 5.2 - Resultados de ensaio de determinação de massa específica

Balão volumétrico	Nº	03	05
Massa específica do material corrigida (ρ_s)	g/cm ³	2,702	2,625

Fonte: Autoras, 2021.

Segundo a norma, os resultados são considerados satisfatórios caso a diferença não seja maior que 0,02 g/cm³. Assim, o ensaio realizado não apresentou conformidade, pois a diferença foi correspondente a 0,077 g/cm³.

Considerando o resultado encontrado e a característica observada do material como expansivo, os ensaios foram realizados novamente, dessa vez utilizando-se 30 gramas de material. Os valores obtidos e resultados são apresentados na Tabela 5.3:

Tabela 5.3 - Resultados do segundo ensaio de massa específica

Balão volumétrico	Nº	03	05
Massa do balão volumétrico vazio	g	179,66	182,46
Massa do material úmido (m)	g	30	30
Umidade higroscópica (w hig)	%	5,6	5,6
Massa do material seco (ms)	g	28,41	28,41
Massa do balão + material + água complementar	g	694,33	697,12
Massa do balão + água total	g	676,28	678,9
Temperatura medida	°C	26,8	26,8
M. Específica água à temp. Medida (pw)	cm³	0,9966	0,9966
Massa específica do material corrigida (ps)	cm³	2,733	2,779

Fonte: Autoras, 2021.

No segundo ensaio, a diferença entre as duas amostras foi de 0,046 g/cm³, sendo mais uma vez insatisfatório conforme a norma, verificando-se que o material não é homogêneo.

5.2 TEOR DE UMIDADE

O ensaio foi preparado de acordo com a norma ABNT NBR 6457 (2016), sendo separadas três amostras do material, que foram pesadas e levadas à estufa por 24h. Através da equação 4.2 foi obtida a porcentagem de teor de umidade. Os dados são apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Dados para determinar umidade

Determinação da Umidade (w)				
Cápsula	Nº	143	34	209
Massa Cápsula	g	11,29	11,18	13,41
Cápsula + Material + Água	g	28,39	26,23	32,37
Cápsula + Material seco	g	27,69	25,64	31,67
Massa da Água	g	0,7	0,59	0,7
Massa do material seco	g	16,4	14,46	18,26
Teor de umidade	%	4,27	4,08	3,83
Umidade	%	4,06		

Fonte: Autoras, 2021.

Os valores encontrados de teor de umidade das amostras foram de 4,27, 4,08 e 3,83%, respectivamente, observando-se uma variação de, aproximadamente, 0,44% entre as amostras. A média do teor de umidade obtida foi de 4,06%.

5.3 GRANULOMETRIA

O ensaio de granulometria foi realizado de acordo com a ABNT NBR 7181 (2016), utilizando 120g do material, que foi levado a estufa por 24h. Na Tabela 5.5 é apresentado o material passante em cada peneira.

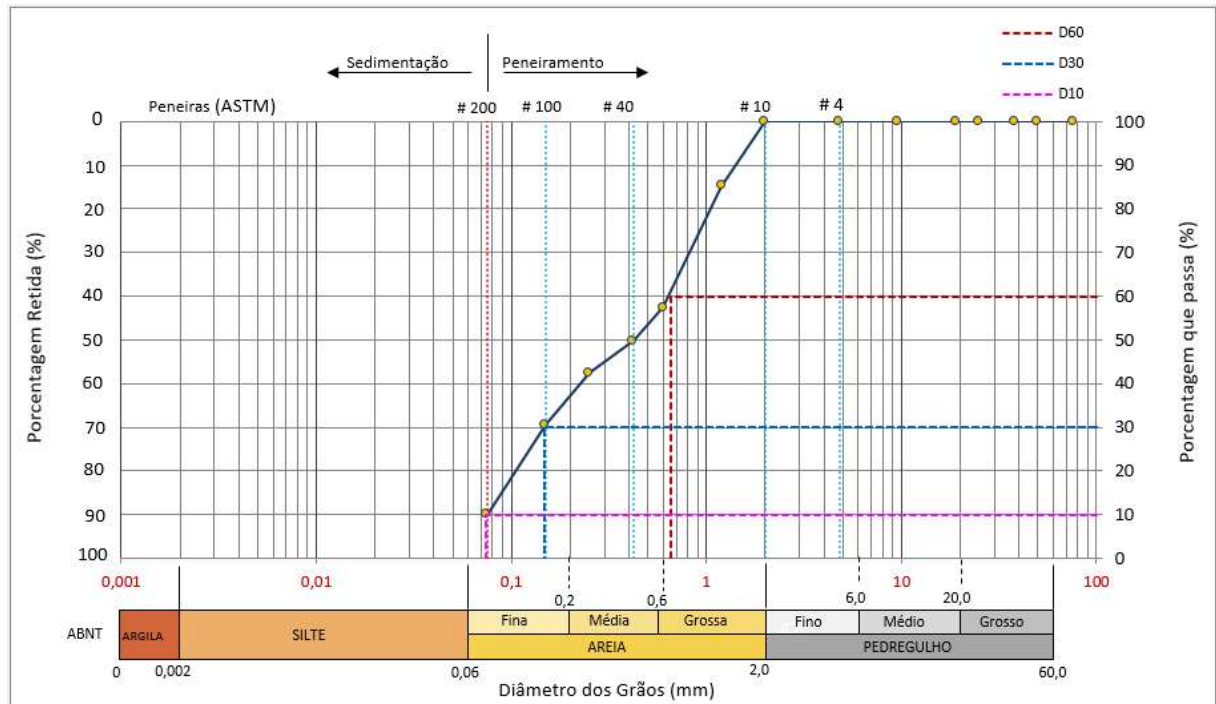
Tabela 5.5 – Dados obtidos do ensaio de granulometria

Peneiramento Fração Fina (Entre 2,00 e 0,075 mm)							
Amostra Parcial Úmida (g)		120	Amostra parcial seca (g)		115,32	K = 1	
Peneira (Serie ABNT)	Abertura (mm)	Material Retido				Material que passa (g)	% Passa Amostra Total
		Massa (g) (A. Parcial)	Massa (g) (A. Total)	% Total	% Acumulado		
16	1,2	16,94	16,94	14,69	14,69	98,38	85,31
30	0,6	32,16	32,16	27,89	42,58	66,22	57,42
40	0,42	8,78	8,78	7,61	50,19	57,44	49,81
60	0,25	8,55	8,55	7,41	57,61	48,89	42,39
100	0,15	13,63	13,63	11,82	69,43	35,26	30,57
200	0,075	23,7	23,7	20,55	89,98	11,56	10,02

Fonte: Autoras, 2021.

Observa-se que as maiores porcentagens de material retido foram nas peneiras 30 (0,6 mm), com 27,89%, e 20% na peneira 200 (0,075mm). Na Figura 5.1 é apresentado a curva granulométrica do material.

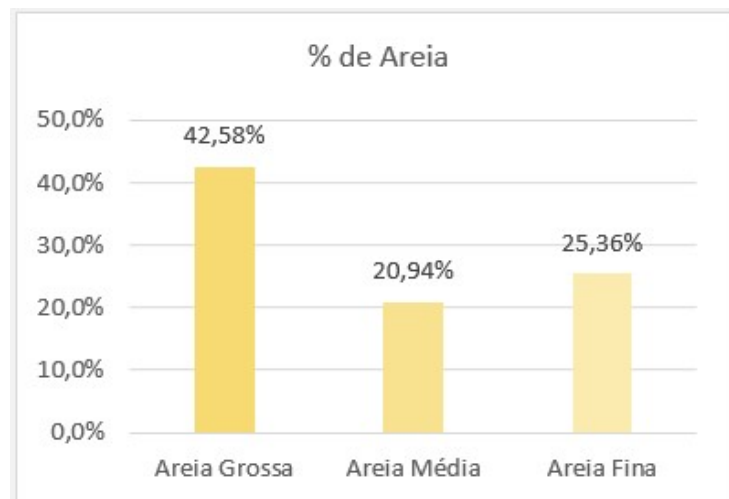
Figura 5.1 – Curva Granulométrica do material



Fonte: Autoras, 2021.

O material tem características próximas à areia, sendo classificado como 42,58% de areia grossa, 20,94% de areia média e 25,36% de areia fina, como demonstrado na Figura 5.2.

Figura 5.2 – Caracterização do material por porcentagem de areia



Fonte: Autoras, 2021.

Durante o ensaio houve perda do material devido a sua finura e leveza, gerando pó. Observou-se que quanto mais o material era peneirado mais ele se desintegrava, tornando suas partículas maiores em finos.

5.4 LIMITE DE LIQUIDEZ E PLASTICIDADE

Para o ensaio de Limite de Liquidez, a amostra foi preparada conforme a norma ABNT NBR 6459 (2016), e durante a mistura do material com água, observou-se que esse absorveu a água adicionada e quanto mais misturava-se o material, mais encharcado ficava, conforme a Figura 5.3 (a). Tal comportamento se manteve durante a transferência para a concha do aparelho de Casagrande, como mostra a Figura 5.3 (b):

Figura 5.3 - Comportamento da cinza durante preparação de ensaio de Limite de Liquidez



(a) Material durante mistura com água.



(b) Material durante transferência para aparelho de Casagrande.

Fonte: Autoras, 2021.

Após a adição do material no aparelho e feita divisão em duas partes na concha com auxílio do cinzel, iniciou-se a aplicação de golpes girando a manivela e o material se uniu na aplicação do quarto golpe, conforme a Figura 5.4. Dada tal condição, o ensaio foi finalizado, e concluiu-se que o material é não coesivo.

Figura 5.4 - Material após aplicação de golpes no aparelho de Casagrande



Fonte: Autoras, 2021.

Observou-se que durante a realização do ensaio de determinação do Limite de Plasticidade conforme a norma ABNT NBR 7180 (2016), a manipulação do material sobre a placa de vidro (Figura 5.5), mostrou que o material apresentou condições de umidade similares ao ensaio de Limite de Liquidez, como evidencia a Figura 5.3(a).

Figura 5.5 - Material na placa de vidro para determinação de Limite de Plasticidade



Fonte: Autoras, 2021.

Na junção do material em formato circular para ser rolada sobre a placa de vidro, observou-se que o material não apresentava consistência para fazer a bola, conforme a Figura 5.6 (a) e ao rolar o material sobre a placa para formação de um cilindro, o mesmo desfez-se, como mostra a Figura 5.6 (b):

Figura 5.6 - Comportamento do material durante a realização de ensaio de Limite de Plasticidade



(a) Material em formato de bola



(b) Material após ser rolado sobre a placa

Fonte: Autoras, 2021.

Os ensaios de consistência são utilizados para descrever o estado físico do material, ou seja, determina o grau de ligação entre as partículas do elemento. Dada a impossibilidade do material em formar o cilindro, confirmou-se que o material é considerado Não Plástico (sem plasticidade), portanto, não apresenta consistência.

5.5 COMPACTAÇÃO (PROCTOR NORMAL)

Para realização dos cálculos, os dados básicos dos materiais são apresentados na Tabela 5.6:

Tabela 5.6 – Dados iniciais para compactação

Peso do Material (g)	Cilindro		
	Tamanho	Pequeno	
500			
Peso do Material Seco (g)	Nº	Peso	Volume
465,1	12	2126	996
	12	2126	996
	12	2126	996
	12	2126	996
Peso Específico Real dos Grãos (g/cm³)			
2,756	12	2126	996

Fonte: Autoras, 2021.

Após a compactação de cada corpo de prova, retirou-se duas amostras de cada para análise da umidade e como resultado foi observado o aumento, como mostra a Tabela 5.7 a seguir:

Tabela 5.7 – Umidade do material (Ensaio de Compactação)

Umidade											
Cilindro nº	Nº	12		12		12		12		12	
Cápsula nº	Nº	274	217	198	33	279	237	194	202	76	47
Massa da Cápsula (C)	g	15,33	14,85	15,67	17,94	13,72	14,07	17,66	11,36	11,17	9,63
Cápsula+Material+Água (C+S+A)	g	37,69	34,91	30,5	35,83	33,99	34,44	36,64	29	30,27	26,59
Cápsula+Material Seco (C+S)	g	29,88	27,89	24,96	29,16	26,39	26,85	29,43	22,3	22,95	19,99
Massa da Água (A)	g	7,81	7,02	5,54	6,67	7,6	7,59	7,21	6,7	7,32	6,6
Massa do Material Seco (S)	g	14,55	13,04	9,29	11,22	12,67	12,78	11,77	10,94	11,78	10,36
Teor de Umidade (h)	%	53,68	53,83	59,63	59,45	59,98	59,39	61,26	61,24	62,14	63,71
Umidade Média	%	53,76		59,54		59,69		61,25		62,92	

Fonte: Autoras, 2021.

Conforme a norma ABNT NBR 7182 (2016), das cinco amostras realizadas, os pontos das duas primeiras devem estar no ramo seco, onde houve a maior variação, a terceira próximo à umidade ótima, preferencialmente no ramo seco, e as últimas duas no estado úmido.

Para as 5 amostras, foram encontrados os graus de saturação e a densidade seca também em índice crescente, enquanto o índice de vazios estava em ordem decrescente, como mostra a Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Grau de Saturação, Índice de Vazios e Densidade Seca

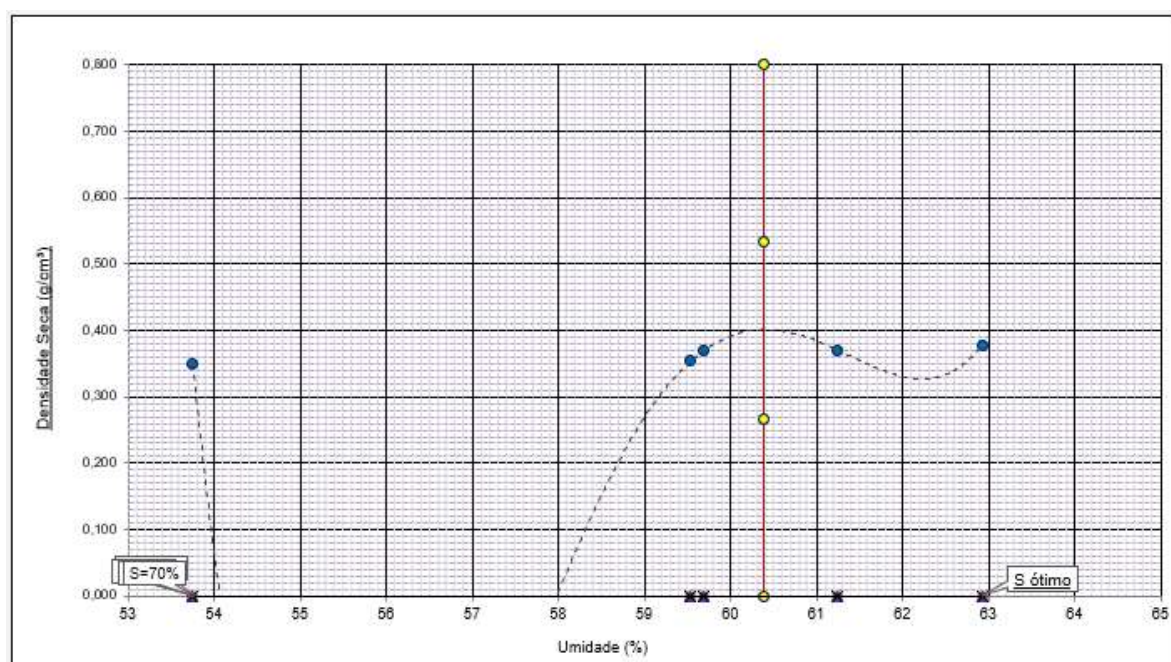
Compactação						
Cilindro n°	Nº	12	12	12	12	12
Água Adicionada	g	250	260	270	280	290
% de Água Adicionada	%	50	52	54	56	58
Umidade Calculada	%	57,5	59,5	61,5	63,5	65,5
Cilindro+Material+Água (C+S+A)	g	2661,1	2687,8	2712,9	2720,4	2738,1
Massa do Cilindro (C)	g	2126	2126	2126	2126	2126
Material+Água (S+A)	g	535,13	561,8	586,9	594,4	612,1
Densidade Úmida (y)	g/cm ³	0,537	0,564	0,589	0,597	0,615
Densidade Convertida	g/cm ³	0,358	0,371	0,383	0,383	0,389
Densidade Seca (Yd)	g/cm ³	0,349	0,354	0,369	0,37	0,377
Índice de Vazios (e)		6,89	6,8	6,47	6,45	6,31
Grau de Saturação	%	21,51	24,15	25,43	26,19	27,5

Fonte: Autoras, 2021.

Conforme visto na tabela 5.8, a densidade seca das amostras pouco variou, o que não corresponde com a teoria, pois quando adicionado água deve haver variação de densidade.

Como resultado, é possível obter a curva de compactação mostrada na (Figura 5.7). Nas abcissas foram marcados os teores de umidade, e nas ordenadas os valores das densidades secas.

Figura 5.7 – Gráfico de Compactação



Fonte: Autoras, 2021.

Como o gráfico não ficou conforme o exigido pela norma, não é possível calcular através desses dados a densidade seca máxima e umidade ótima. Tendo em vista que o material não apresentou o comportamento esperado, a Figura 5.8 apresenta como o material reagiu após impacto.

Figura 5.8 - Material pós atrito



Fonte: Autoras, 2021.

Assim, verifica-se que o material não é estável, ou seja, não possui resistência para manter-se permanente com as variações climáticas ou cargas que devem ser suportadas.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos nessa pesquisa comprovam que a cinza de madeira de eucalipto não apresenta as características que os materiais usualmente aplicados na pavimentação necessitam para ter-se um bom desempenho e atender as normativas. Verificou-se através dos ensaios realizados pelas autoras as seguintes conclusões:

- Os valores obtidos na determinação de massa específica do material, realizado conforme as especificações da norma ABNT NBR 6458 (2016) indicam que a diferença dos resultados do material na primeira tentativa foi $0,077 \text{ g/cm}^3$, não atendendo ao especificado pela norma, que deve ser de $0,02 \text{ g/cm}^3$. Observado tal resultado, repetiu-se a análise, porém a diferença manteve-se não satisfatória, sendo de $0,046 \text{ g/cm}^3$. Devido a inconsistência dos resultados, não é possível determinar o índice de vazios.
- A partir da análise granulométrica do material, observa-se que pouco mais de 20% ficou retido na peneira 200 ($0,075 \text{ mm}$) e 27,89% na peneira 30 ($0,6 \text{ mm}$) e conforme verificado na curva, todo o material é de finos, da classificação de areia. Desses, 42,58% têm características relacionadas à areia grossa e 25,36% à areia fina.
- Quanto às características de plasticidade do material, não foi possível a realização total dos ensaios de determinação do Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade, devido ao comportamento que esse apresentou, absorvendo e não alcançando as condições necessárias para prosseguimento. Assim, concluiu-se que a cinza de madeira trata-se de um material não plástico (NP).
- O comportamento das cinzas quando submetidas à compactação não apresentou o resultado esperado, com uma variação de densidade seca significativamente baixa, dada a adição de água durante o ensaio. Assim, não foi possível determinar a densidade seca máxima e a umidade ótima do material. Verificou-se ainda que o conjunto compactado é facilmente destruído ao menor impacto, pois apresentou-se como um material não estável e sem resistência.

Dessa forma, conclui-se que a cinza de eucalipto, avaliada isoladamente, através dos ensaios realizados, não se apresentou como um material satisfatório conforme as

normas regulamentadoras para aplicação em pavimentos flexíveis, respondendo ao objetivo geral do estudo.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Avaliar o comportamento das cinzas de madeira quando acrescentadas à solos na realização do ensaio de compactação e de limite de liquidez e plasticidade;
- Avaliar a viabilidade socioeconômica da mistura da cinza de madeira com outros materiais usualmente aplicados à pavimentação;
- Avaliar o comportamento dos blocos compactados de cinza de madeira quando submetida a pressão, estando confinada;
- Avaliar as características do material quando misturado ao agregado miúdo em pavimentos rígidos;
- Avaliar a aplicação da cinza de eucalipto na produção de filtros de carvão para uso ambiental em contaminantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHY, A. **Análise da viabilidade técnica da utilização da cinza de madeira em concreto compactado com rolo em sub base de pavimentos.** 2018. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2018.

ANEPAC - Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para a construção civil. Disponível em: <<http://www.anepac.org.br/>>. Acesso em 11 de maio de 2021.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6457:** Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6458:** Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6459:** Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7180:** Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7181:** Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7182:** Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição. **Pesquisa Setorial.** Disponível em: <https://abrecon.org.br/pesquisa_setorial/>. Acesso em 10/06/2021.

ARAUJO, L. M. D. **Estudo do comportamento de material fresado de revestimento asfáltico visando sua aplicação em reciclagem de pavimentos.** Tese de doutorado submetida ao departamento de engenharia civil e ambiental da universidade de Brasília. Brasília, 2004.

ARAUJO, M. A., *et. al.* Análise Comparativa de Métodos de Pavimentação – Pavimento Rígido (concreto) x Flexível (asfalto). **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo Do Conhecimento.** Ano 01, Edição 11, Vol. 10, pp. 187-196, Novembro, 2016.

ARAUJO, W. E. L. **Aproveitamento de resíduos da extração de micaxisto em pavimentos flexíveis.** Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente da Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2008.

BARROS, E. T.; MELLO, M. A. S. Estudo da viabilidade mecânica da adição da cinza proveniente da queima de pinus no concreto asfáltico flexível. **Ignis**, Caçador, p. 113- 133, setembro, 2017.

BENNACK, V. **Análise da viabilidade técnica da reutilização da cinza de madeira em produtos cimentícios.** 2016. p. 133 Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado Santa Catarina. Joinville, 2016.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica:** Formação Básica para Engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobras: Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos, 2006.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: 3. Ed. Petrobras: Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos, 2010.

BRASIL, Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília, DF, 02 de agosto de 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002**. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da União. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>. Acesso em 10 de junho de 2021.

COELHO, J. G. M. **Preparação, caracterização e aplicação de asfalto modificado por madeira/borracha: execução em pista experimental em Macapá-AP**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais) Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará - UFPA. Área de concentração Materiais e Processos de Fabricação, Belém, Pará, 2019.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES – CNT. **Pesquisa CNT de rodovias 2012**. Brasília: CNT: SEST SENAT, 2012.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES – CNT. **Pesquisa CNT de rodovias 2019**. Brasília: CNT: SEST SENAT, 2019.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT. **Transporte rodoviário: por que os pavimentos das rodovias não duram?** 2017. Disponível em: <<http://anut.org/wp-content/uploads/2017/10/Pavimentos.pdf>>. Acesso em 20 de maio de 2021.

DAVID, D. **Misturas asfálticas recicladas a frio: Estudo em Laboratório Utilizando Emulsão e Agente de Reciclagem Emulsionado**. 2006. p. 128 Dissertação (Mestrado em Engenharia) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Rio Grande do Sul, 2001.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação**. 3 ed. Rio de Janeiro, 2006.

FARIAS, E. R. **A utilização de misturas solo/cinza pesada na pavimentação - Análise de aspectos de comportamento mecânico e ambiental**. 2005. P. 121 Dissertação (Mestrado em Engenharia) Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Santa Catarina, 2005.

FOELKEL, C. **Eucalyptus Online Book: Os eucaliptos e os elementos não processuais na fabricação de celulose kraft**. Disponível em: <https://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT25_ResiduosMinerais.pdf>. Acesso em 07 de junho de 2021.

FURLAN. **Britador de Mandíbulas (Linhas BM)**. Disponível em: <<https://furlan.com.br/britador-mandibulas.php>>. Acesso em 10 de junho de 2021.

GÓMEZ-PABLO, F. G. **Práticas sustentáveis nos pavimentos e sua possível aplicação no mercado brasileiro: presente e futuro**. Projeto de Graduação – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 67. 2017.

GRANDO, A. J. **Estudo das Propriedades do Ligante Asfáltico 50-70 Modificado com Cinza de Resíduos de Madeira**. 2019. 97 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal da Integração Latino-Americana. Foz do Iguaçu, 2019.

GRUBBA, D. C. R. P. **Estudo do comportamento mecânico de um agregado reciclado de concreto para utilização na construção rodoviária**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Transportes) Universidade de São Paulo. São Carlos, 2009.

- LEITE, F. C. **Comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil em camadas de base e sub-base de pavimentos**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- LEITE, L. F. M. Sustentabilidade de Pavimentos Asfálticos. **Boletim Técnico SINICESP**. São Paulo. 7 ed. Junho, 2013.
- LI, Y. ZHOU, H. SU, L. HOU, H. DANG, L. **Investigation into the application of construction and demolition waste in urban roads**. *Advances in Materials Design and Engineering*. Volume 2017.
- LOUZADA JUNIOR, M. A.; ALVES, M. C. S.; VALARELLI, I. D.; SANCHEZ, L. E. A.; PEREZ, F. R. C. O contexto brasileiro e as oportunidades de aproveitamento de resíduos de madeira. **Saúde e Meio Ambiente**, Três Lagoas, v. 5, n. 3, p. 24-40, 2017.
- LUZ, M.P. **Aproveitamento de fíler de pedreiras da região metropolitana de Goiânia em pavimentos flexíveis urbanos**. 2008. 103 f. Tese (Doutorado) Programa de Doutorado em Ciências Ambientais, Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2008.
- HÓMEZ, J. H. G. **Avaliação de rodovias goianas restauradas com a técnica de reciclagem a frio in situ**. 2014. 173 f. Dissertação (Mestrado) Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.
- MARQUES, M. O. **Avaliação de trechos de pavimentos experimentais construídos com materiais alternativos na região metropolitana de Goiânia**. 2012. 67 f. Dissertação (Pós-Graduação Geotecnia, estruturas e Construção Civil), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2012.
- MENDES, T. A.; REZENDE, L. R.; OLIVEIRA, J. C.; GUIMARAES, R. C.; CARVALHO, J. C.; VEIGAS, R. **Parâmetros de uma pista experimental executada com entulho reciclado**. In: Reunião Anual de Pavimentação, 35, Rio de Janeiro, 2004.
- Ministério da Infraestrutura. **Rodovias Federais**. 2019. Disponível em: <<https://antigo.infraestrutura.gov.br/rodovias-brasileiras.html>>. Acesso em 09 de dezembro de 2021.
- MOTTA, R. S. **Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego**. 2005. p. 27-31 Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- NCHRP: NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. **GA Manual for Design of hot mix Asphalt with Commentary**. Report. n 673. Transportation Research Board National Committee, Washington D.C, 2011, 285 p.
- OLIVEIRA, J. C. **Indicadores de potencialidades e desempenho de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil em pavimentos flexíveis**. 2007. 167 f. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.
- SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. Vol. 1. 2. ed. São Paulo: Pini, 2007.
- SILVA, A. J. **Estudo da viabilidade de utilização da cinza pesada em adição ao Concreto Compactado com Rolo (CCR) destinado a camada de base de pavimentos híbridos**. 2006. 180f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal de Santa Catarina- UFSC, Florianópolis. 2006.

SOUZA, J. M. **Resíduos de construção civil: geração, gestão e uso para fins de pavimentação.** XI EPCC (Encontro Internacional de Produção Científica). Centro Universitário de Maringá – UniCesumar, Maringá, 2019.

VAN DAM, THOMAS J., *et al.* 2015. **Towards Sustainable Pavement Systems.** Washington DC, Estados Unidos. Departamento de Transporte dos EUA, Rodovia Federal Administração, 2015.

ANEXO A – NBR 6458

Massa específica da água, em g/cm³ entre 0°C e 40°C

°C	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999
1	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999
7	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999
8	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998
9	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998	0,9997	0,9997
10	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9996
11	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9995	0,9995
12	0,9995	0,9995	0,9995	0,9995	0,9995	0,9995	0,9995	0,9994	0,9994	0,9994
13	0,9994	0,9994	0,9994	0,9994	0,9994	0,9993	0,9993	0,9993	0,9993	0,9993
14	0,9993	0,9993	0,9992	0,9992	0,9992	0,9992	0,9992	0,9992	0,9992	0,9991
15	0,9991	0,9991	0,9991	0,9991	0,9991	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
16	0,999	0,999	0,9989	0,9989	0,9989	0,9989	0,9989	0,9989	0,9988	0,9988
17	0,9988	0,9988	0,9988	0,9987	0,9987	0,9987	0,9987	0,9987	0,9987	0,9986
18	0,9986	0,9986	0,9986	0,9986	0,9985	0,9985	0,9985	0,9985	0,9985	0,9985
19	0,9984	0,9984	0,9984	0,9984	0,9984	0,9983	0,9983	0,9983	0,9983	0,9983
20	0,9982	0,9982	0,9982	0,9982	0,9981	0,9981	0,9981	0,9981	0,9981	0,998
21	0,998	0,998	0,998	0,998	0,9979	0,9979	0,9979	0,9979	0,9978	0,9978
22	0,9978	0,9978	0,9978	0,9977	0,9977	0,9977	0,9977	0,9977	0,9976	0,9976
23	0,9976	0,9975	0,9975	0,9975	0,9975	0,9974	0,9974	0,9974	0,9974	0,9974
24	0,9973	0,9973	0,9973	0,9973	0,9972	0,9972	0,9972	0,9972	0,9971	0,9971
25	0,9971	0,997	0,997	0,997	0,997	0,9969	0,9969	0,9969	0,9969	0,9968
26	0,9968	0,9968	0,9968	0,9967	0,9967	0,9967	0,9967	0,9966	0,9966	0,9966
27	0,9965	0,9965	0,9965	0,9965	0,9964	0,9964	0,9964	0,9963	0,9963	0,9963
28	0,9963	0,9962	0,9962	0,9962	0,9962	0,9961	0,9961	0,9961	0,996	0,996
29	0,996	0,9959	0,9959	0,9959	0,9959	0,9958	0,9958	0,9958	0,9957	0,9957
30	0,9957	0,9956	0,9956	0,9956	0,9956	0,9955	0,9955	0,9955	0,9954	0,9954
31	0,9954	0,9953	0,9953	0,9953	0,9952	0,9952	0,9952	0,9951	0,9951	0,9951
32	0,9951	0,995	0,995	0,995	0,9949	0,9949	0,9949	0,9948	0,9948	0,9948
33	0,9947	0,9947	0,9947	0,9946	0,9946	0,9946	0,9945	0,9945	0,9945	0,9944
34	0,9944	0,9944	0,9943	0,9943	0,9943	0,9942	0,9942	0,9942	0,9941	0,9941
35	0,9941	0,994	0,994	0,994	0,994	0,9939	0,9939	0,9939	0,9938	0,9937
36	0,9937	0,9937	0,9936	0,9936	0,9936	0,9935	0,9935	0,9935	0,9934	0,9934
37	0,9934	0,9933	0,9933	0,9932	0,9932	0,9932	0,9931	0,9931	0,9931	0,993
38	0,993	0,993	0,9929	0,9929	0,9928	0,9928	0,9928	0,9927	0,9927	0,9927
39	0,9926	0,9926	0,9925	0,9925	0,9925	0,9924	0,9924	0,9924	0,9923	0,9923
40	0,9922									