



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

CAMPUS RUSSAS

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

PEDRO ISAAC DAMASCENO PEREIRA

**ESTABILIZAÇÃO DE SOLO COM BAGANA DE CARNAÚBA PARA USO EM
PAVIMENTAÇÃO**

RUSSAS

2021

ESTABILIZAÇÃO DE SOLO COM BAGANA DE CARNAÚBA PARA USO EM
PAVIMENTAÇÃO

Trabalho de conclusão de curso apresentada ao Curso de Engenharia Civil no Campus Russas da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^ª. M.Sc. Camila Lima Maia.

RUSSAS
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- P494e Pereira, Pedro.
Estabilização de Solo com Bagana de Carnaúba para Uso em Pavimentação / Pedro Pereira. – 2021.
81 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas,
Curso de Curso de Engenharia Civil, Russas, 2021.
Orientação: Prof. Me. Camila Lima Maia.
1. Bagana de Carnaúba. 2. Estabilização de Solos. 3. Pavimentação. I. Título.

CDD 620

ESTABILIZAÇÃO DE SOLO COM BAGANA DE CARNAÚBA PARA USO EM
PAVIMENTAÇÃO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil do Campus Russas da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Profª. Msc. Camila Lima Maia (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Msc. Andriele Nascimento de Souza
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profª. Msc. Daniela Lima Machado da Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico este trabalho a Deus por todo conforto e fortaleza espiritual;

A minha mãe, Fátima, por todo amor, apoio, carinho, incentivo e ensinamento;

As minhas irmãs, Ilaina e Ilíada, por todo amor e palavra de apoio;

A minha avó, Raimunda (*in memorian*), por sempre me apoiar e torcer por mim desde o princípio.

AGRADECIMENTOS

Deixo aqui meus sinceros agradecimentos, primeiramente, à Deus, por toda a força que me foi concedida durante essa longa jornada de cinco anos e por me crente que poderia superar todos os desafios que surgiam.

À minha família: Fátima, Ilaina e Ilíada, que me ensinaram o valor do esforço diário e foram ferramentas de incentivo e motivação diária, por todo apoio, amor e ensinamento repassado durante esse período. Em especial, sou grata à minha avó, Raimunda, que sempre torceu por mim e diariamente intercedeu por mim em suas orações, infelizmente, não foi possível acompanhar até o final da jornada acadêmica, mas sei que junto ao Pai, me guiou durante todas as escolhas que fiz.

Aos meus amigos de curso e de infância, pois sem eles, o caminho teria sido mais turbulento. A todos os bons momentos que compartilhamos estudando para as atividades acadêmicas e aos maus momentos que compartilhamos juntos, vocês tornaram-se minha segunda família e só foi possível chegar a esse ponto, graças a todos esses momentos compartilhados.

A minha orientadora, Camila, pela paciência, dedicação e disposição em todos os momentos em que precisei do seu auxílio.

A técnica laboratorial, Myckelle, por toda a disponibilidade e ajuda durante o período de ensaios, além de mostrar-se sempre motivada e me apoiar durante a fase experimental.

A Agrocera LTDA, por fornecer o material necessário para a pesquisa, em especial ao Diego, responsável por fazer a ponte entre mim e a empresa.

“Tudo posso naquele que me fortalece”

Felipenses 4:13

RESUMO

A exploração desordenada de materiais para a pavimentação tem provocado uma escassez de material natural adequado para o uso nas obras rodoviárias. Tendo em vista essa problemática, a estabilização de solos surge como uma forma de atender as resistências idealizadas no projeto, pois possibilita melhorar o comportamento mecânico da mistura. A região do Vale do Jaguaribe é reconhecida pela sua produção de cera de carnaúba, portanto propõe-se a utilização da bagana da carnaúba, resíduo gerado durante o processo de fabricação da cera, como forma de estabilização do solo. Foram realizados ensaios normatizados a fim de caracterizar o solo utilizado, oriundo da jazida municipal de Russas. O solo foi misturado a diferentes porcentagens de bagana, e depois essas porcentagens de solo-bagana foram adicionadas a diferentes quantidades de cimento, de modo a analisar o comportamento das misturas. Para as misturas com solo-bagana e solo-bagana com adição de cimento foram realizados ensaios de Compactação, Resistência à Compressão Simples (RCS) e Módulo de Resiliência (MR), a fim de caracterizar sua resistência mecânica. Os resultados comprovaram que a mistura solo-bagana com adição de 10% de cimento (mistura 4), apresenta um comportamento satisfatório para o uso em camadas de sub-base dos pavimentos. A mistura 4 foi avaliada para diferentes situações de tráfego, sendo elas: leve, médio e pesado. No tráfego leve mostrou um ótimo desempenho, atendendo todas as espessuras mínimas das camadas definidas pelo DNIT. Já no tráfego médio, foi possível obter espessuras mínimas nas camadas de base e sub-base do pavimento, e uma vida útil de projeto de 10 anos. Por último, no que diz respeito ao tráfego pesado, a camada de revestimento obteve a espessura máxima definida por norma, porém, foi possível analisar que o aumento na espessura da camada da mistura 4, promoveu uma redução na camada de revestimento e com isso menor custo no valor final do pavimento.

Palavras-chave: Estabilização de solos. Bagana. Solo-cimento. Pavimento.

ABSTRACT

The exploration of materials for paving has caused a shortage of natural material suitable for use in road works. In view of this problem, soil stabilization emerges as a way to meet the strengths idealized in the project, because it allows improving the mechanical behavior of the mixture. The Vale do Jaguaribe region is known for its production of carnauba wax. Therefore, we propose the use of carnauba bagana, a residue generated during the wax production process, as a form of soil granulometric stabilization. Standardized tests were performed in order to characterize the soil used, coming from the Russas municipal deposit. The soil was mixed with different percentages of bagasse, and then these soil-bagasse percentages were added different amounts of cement, in order to analyze the behavior of the mixtures. For the mixtures with bagana-soil and bagana-soil with cement addition, compaction, compressive strength (CS) and resilient modulus (MR) tests were performed, in order to characterize their mechanical strength. The results proved that the bagana-soil mix with 10% cement addition (mixture 4), presents a satisfactory behavior for use in sidewalk subgrade layers. Mixture 4 was evaluated for different traffic situations: light, medium and heavy traffic. In light traffic it showed a great performance, meeting all the minimum thicknesses of the layers defined by DNIT. In medium traffic, it was possible to obtain minimum thicknesses in the base and sub-base layers of the sidewalk, and a design life of 10 years. Finally, with respect to heavy traffic, the overlay obtained the maximum thickness defined by standard, however, it was possible to analyze that the increase in the layer of mixture 4, promoted a reduction in the overlay and thus lower cost in the final value of the sidewalk.

Keywords: Soil stabilization. Bagana. Soil-Cement. Sidewalk.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ciclo das Rochas.....	23
Figura 2 - Sistema de Classificação AASHTO.....	25
Figura 3 - Terminologia do Sistema Unificado de Classificação	26
Figura 4 - Sistema Unificado de Classificação.....	26
Figura 5 - Classificação MCT	27
Figura 6 - Resistência à compressão simples do solo estabilizado com cimento.....	30
Figura 7 - Esquema das principais razões físico-químicas que ocorrem num solo tratado com cal.....	31
Figura 8 - Comparativo das Resistências à tração	32
Figura 9 - Partículas de Cinzas Volantes com ampliação de 2000x	34
Figura 10 - Representação da composição esquemática do aço	35
Figura 11 - Composição típica da escória pelo processo LD no Brasil.....	35
Figura 12 - Comparação do preço da escória e da brita pela distância do estudo	36
Figura 13 - Composição química de várias cinzas de casca de arroz.....	37
Figura 14 - Valores de ISC.....	38
Figura 15 - Teores obtidos para a expansão e o ISC para todas as amostras	39
Figura 16 - Mapa do Estado Ceará com destaque nos Agropolos.....	40
Figura 17 - Mapa Político do Baixo Jaguaribe	41
Figura 18 - Processo de secagem da palha da carnaubeira.....	42
Figura 19 - Atores sociais no processo produtivo da Carnaúba	43
Figura 20 - Caracterização dos ligantes Puro e Modificado.....	43
Figura 21 - Valores encontrados para as TUC das amostras de ligantes asfáltico puro e modificado.....	44
Figura 22 - Fluxograma metodológico	46
Figura 23 - Localização da jazida municipal em relação ao campus de Russas.....	47
Figura 24 - Propriedades físico-químicas CP II E 32 RS	47
Figura 25 - Vista aérea da Agrocera Indústria Comércio e Exportação de Cera Vegetal LTDA.	48
Figura 26 - Fluxograma de definição das misturas a serem estudadas.....	49
Figura 27 - Fluxograma do programa experimental utilizado para a pesquisa.....	50
Figura 28 - Primeiro ponto do ensaio de LP.....	51
Figura 29 - Materiais utilizados para o ensaio de LL	52

Figura 30 - Corpo de prova do ensaio de Compactação Proctor normal.....	53
Figura 31 - Solo com 5% de Bagana	54
Figura 32 - Prensa utilizada para o ensaio	55
Figura 33 - Corpos de prova em imersão para o ensaio	55
Figura 34 - Faixas granulométricas de materiais para base de pavimentos.....	59
Figura 35 - Tipos de granulometria	60
Figura 36 - Curva de MR para o modelo composto	68
Figura 37 - Tráfego Leve (EST1).....	69
Figura 38 - Tráfego Médio (EST2).....	69
Figura 39 - Tráfego Pesado (EST3).....	70
Figura 40 - Tráfego Pesado com redução (EST4)	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características físicas e químicas da bagana de carnaúba	49
Tabela 2 - Normas empregadas para os ensaios realizados no solo	51
Tabela 3 - Normas empregadas para os ensaios realizados no solo com bagana	53
Tabela 4 - Normas empregadas para os ensaios realizados no solo com bagana e cimento	56
Tabela 5 - Modelos de comportamentos resilientes utilizados	57
Tabela 6 - Valores dos limites de Atterberg	58
Tabela 7 - Análise granulométrica do solo	58
Tabela 8 - Resultados das 3 misturas para o ensaio de RCS	64
Tabela 9 - Resultado do ensaio de RCS com adição de cimento.....	65
Tabela 10 - Resultado do ensaio de RCS com adição de cimento para a mistura 4.....	66
Tabela 11 - Valores dos parâmetros para os diferentes modelos resilientes	67
Tabela 12 - Tipos de tráfego	69
Tabela 13 - Custo para construção das camadas da EST3.....	71
Tabela 14- Custo para a construção das camadas da EST4.....	72

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva granulométrica do solo estudado	59
Gráfico 2 - Curva de compactação do solo estudado	62
Gráfico 3 - Curva de compactação com a mistura de 5% de bagana	63
Gráfico 4 - Curva de compactação com a mistura de 10% de bagana	63
Gráfico 5 - Curva de compactação com a mistura de 15% de bagana	64
Gráfico 6 – Modelo resiliente clássico (Tensão desvio).....	67
Gráfico 7 - Modelo resiliente clássico (Tensão de confinamento).....	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highways and Transportation Officials</i>
Al_2O_3	Óxido de Alumínio
CAP	Cimento Asfálticos de Petróleo
CBC	Cinza de Bagaço de Cana
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CC	Coefficiente de curvatura
CCA	Cinza da Casca de Arroz
CNU	Coefficiente de Não Uniformidade
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CP	Corpo de Prova
DNER	Departamento de Engenharia de Transportes
DNIT	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DP	Deformação Permanente
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EUA	Estados Unidos da América
FEA	Forno elétrico a Arco

ISC	Índice de Suporte Califórnia
IP	Índice de Plasticidade
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
LTDA	Limitada
MCT	Miniatura, Compactado, Tropical
MR	Módulo de Resiliência
RBVT	Rodovias de Baixo Volume de Tráfego
RCS	Resistência à Compressão Simples
RT	Resistência à Tração
SEDET	Secretária de Desenvolvimento Econômico
SMA	<i>Stone Matrix Asphalt</i>
UFC	Universidade Federal do Ceará

LISTA DE SÍMBOLOS

Al_2O_3	Óxido de Alumínio
Cc	Coefficiente de curvatura
Cu	Coefficiente de uniformidade
σ_d	Tensão Desvio
σ_3	Tensão Confinante
ϵ_r	Deformação Resiliente
R^2	Coefficiente de Correlação
N	Número de Ciclos
K	Parâmetro de Modelagem
SiO_2	Sílica

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	19
1.2	Problema da Pesquisa	20
1.3	Justificativa	21
1.4	Objetivos.....	21
1.4.1	Objetivo Geral	21
1.4.2	Objetivo Específicos	21
1.5	Estrutura do trabalho.....	22
2.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	23
2.1	Definição de solos.....	23
2.2	Classificação do solo	24
2.2.1	Sistema de Classificação da AASHTO.....	24
2.2.2	Sistema de Unificado de Classificação de Solos	25
2.2.3	Classificação MCT	27
2.3	Estabilização de solos	28
2.3.1	Estabilização de solos com cimento	29
2.3.2	Estabilização de solos com cal	30
2.3.3	Estabilização de solos com Emulsões Asfálticas.....	31
2.3.4	Estabilização de solos com Material Alternativo	33
2.3.4.1	Estabilização de solos com Cinza Volante	33
2.3.4.2	Estabilização de solos com Escória Aciaria	34
2.3.4.3	Estabilização de solos com Cinzas da Casca de Arroz.....	36
2.3.4.4	Estabilização de solos com cinzas de bagaço de cana-de-açúcar	38
2.4	Agropólo Baixo Jaguaribe e a importância da carnaúba	39
2.5	Uso da carnaúba na pavimentação.....	43
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
3.1	Considerações Iniciais	45
3.2	Materiais	46
3.2.1	Solo.....	46
3.2.2	Cimento.....	47
3.2.3	Bagana de Carnaúba	48
3.2.4	Mistura solo-resíduo	49
3.3	Programa Experimental	50

3.3.1	Ensaio realizado no solo natural.....	50
3.3.1.2	Ensaio de Caracterização	50
3.3.1.3	Ensaio de Compactação	52
3.3.2	Ensaio realizado no solo natural com bagana.....	53
3.3.2.1	Ensaio de Compactação	54
3.3.2.2	Ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCS).....	55
3.3.3	Ensaio realizado no solo natural com bagana e adição de cimento.....	55
3.3.3.1	Módulo de Resiliência	56
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	58
4.1	Resultados dos ensaios realizados no solo natural	58
4.1.1	Limites de Atterberg	58
4.1.2	Análise granulométrica do solo	58
4.1.3	Classificação AASHTO	61
4.1.4	Curva de compactação	61
4.1.5	Resistência à compressão simples	62
4.2	Análise do comportamento das misturas de solo-bagana	62
4.2.1	Curva de compactação	62
4.2.2	Resistência à compressão simples	64
4.3	Análise do comportamento das misturas de solo-bagana com adição de cimento.....	65
4.3.1	Resistência à compressão simples	65
4.3.2	Módulo de Resiliência	67
4.4	Dimensionamento do pavimento	69
4.5	Análise Financeira	72
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	74
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	75
	REFERÊNCIAS	76

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Ao longo do século XVIII, a Ribeira do Jaguaribe foi uma das principais capitanias do Ceará devido a sua localização estratégica, interligando os sertões ao litoral. Com isso, a região, agora conhecida como Baixo Jaguaribe, teve uma grande relevância econômica durante o período colonial e os impactos da sua exploração refletem até hoje na economia local. A paisagem composta pelos carnaubais foi determinante na trajetória histórica da região, pois foi amplamente utilizada, desde a concepção de moradias até a sua exploração econômica (LIMA, 2007).

O investimento público-privado também possui uma significância, pois é outro setor econômico em constante progresso. Esse desenvolvimento foi possível graças a políticas públicas de incentivos financeiros e fiscais. Segundo SEDET (2017)

“As empresas industriais incentivadas pelo Governo do Ceará nas diferentes regiões cearenses são responsáveis por 100% dos empregos da indústria no Sertão Central; 77% no Litoral Oeste/Vale do Curu; 70% no Sertão de Sobral; 49% no Vale do Jaguaribe; [...]”.

A pluralização do setor industrial é grande, há indústrias alimentícias, têxteis, de minerais não metálicos, ceramistas, calçadistas e extração da cera de carnaúba. O agronegócio é um dos responsáveis pelo crescimento econômico do BaixoJaguaribe. A fruticultura irrigada desenvolvida é um dos principais polos exportadores do país,destinado à Europa, América do Norte e Ásia. O escoamento dos produtos acontece por rodovias estaduais e federais. Segundo Araújo (2016)

“O Eixo da BR-116 se destaca, tanto pelo seu caráter funcional como estrutural, facilitando a circulação e escoamento da produção notadamente para o Complexo Portuário do Pecém e Complexo Portuário de Fortaleza, colocando esses dois portos entre os maiores exportadores de frutas frescas do Brasil.”

A qualidade das vias que são utilizadas está ligada diretamente à velocidade de escoamento dos produtos. Faz-se necessário uma manutenção apropriada da estrutura do

sistema viário do Vale do Jaguaribe, pois quanto melhor o escoamento da produção, maior o desenvolvimento econômico local.

A crescente inquietação com a escassez de materiais com características geotécnicas adequadas para o uso na construção dos pavimentos tem sido amplamente discutida, e a carência desses materiais pode significar um custo final maior na construção e manutenção das rodovias. Portanto, surge como solução a busca por um material capaz de atender às necessidades da tarefa prevista. Essa solução recebe o nome de estabilização de solos, que consiste em alterar as propriedades do solo para a sua utilização no projeto (CRISTELO, 2001).

Atrelado à exploração dos carnaubais, surge uma oportunidade relevante para o cenário de obras rodoviárias local. As obras rodoviárias compreendem grandes movimentações de terra e uma grande quantidade de materiais negativos. Isso gera um enorme impacto no custo final da obra e também um elevado impacto ambiental. Buscando reduzir esses impactos e visando dar uma melhor destinação final aos resíduos produzidos na região, foi estudado a utilização dos resíduos gerados na confecção da cera da carnaúba para a estabilização de solos para pavimentação, e assim buscar reduzir a destinação final incorreta ou sua queima sem controle.

Nesse sentido, o presente trabalho busca estudar o comportamento do solo através da adição da bagana de carnaúba – resíduo gerado no processo de fabricação da cera de carnaúba – e o seu comportamento nos pavimentos rodoviários. Vale ressaltar que a palha representa uma parcela do material que seria descartado na natureza, portanto o estudo busca utilizar este material como uma forma alternativa de aproveitamento.

1.2 Problema da Pesquisa

A escassez natural de materiais com características geotécnicas suficientes para a utilização na pavimentação eleva o custo final das obras e a exploração das jazidas provocam um grande impacto ambiental. Sendo assim, a utilização de materiais alternativos surge como uma forma de mitigação do impacto ambiental gerado na manutenção e construção das rodovias.

Entre as diversas pesquisas destinadas na melhoria desses materiais empregados na construção dos pavimentos rodoviários, destacam-se os resíduos gerados da produção agroindustrial. O Vale do Jaguaribe é uma das regiões que mais exporta produtos derivados da carnaúba no Ceará, por conta do processo produtivo uma quantidade de resíduos é gerada e parte desse resíduo acaba por não ser utilizado, promovendo uma destinação final incorreta ou uma queima sem controle.

Surge a partir disso um interesse na utilização desse resíduo na estabilização de solos em substituição total ou parcial de outros materiais estabilizantes já conhecidos para a pavimentação, agregando valor ao resíduo gerado e reduzindo os impactos ambientais negativos gerados durante o processo de extração dos materiais para a construção dos pavimentos.

1.3 Justificativa

O presente estudo é justificado pela contribuição, tanto socioeconômica, como ambiental, que a utilização de materiais alternativos pode oferecer para a área de pavimentação. A palha utilizada no estudo não contém valor agregado e seria rejeitada no meio ambiente. Por sua vez, a escassez de materiais com características geotécnicas suficientes para os pavimentos é uma realidade não somente local, mas predominante no Brasil, devido ao crescimento da malha rodoviária nacional.

O desenvolvimento de novas tecnologias possibilita contribuir de alguma forma para a atenuação dos impactos ambientais gerados pela extração nas jazidas e paralelamente a isso atende as características de projetos solicitadas aos pavimentos. Dessa forma, a estabilização de solos com a utilização da palha de carnaúba pode ser uma solução promissora, ambientalmente segura e economicamente viável.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

Analisar a utilização da bagana de carnaúba como um material alternativo para a estabilização de solo do município de Russas, Ceará, e sua viabilidade econômica para a aplicação em camadas de pavimentos.

1.4.2 Objetivo Específicos

- Coletar e caracterizar geotecnicamente, através de ensaios de laboratório, uma amostra de solo do município de Russas;
- Determinar as porcentagens de palha de carnaúba necessária para realizar a estabilização do solo, de modo que atenda às condições mínimas de projeto para sua utilização nas camadas dos pavimentos;

- Analisar o comportamento mecânico de com a inserção de diferentes porcentagens de palha de carnaúba;
- Avaliar a influência do tempo de cura na mistura solo e bagana de carnaúba;
- Analisar, no caso de resultados assertivos, qual a camada de pavimento mais indicada para o uso do material alternativo.

1.5 Estrutura do trabalho

No capítulo 1, é apresentada uma contextualização sobre o assunto a ser abordado, como também os objetivos gerais e específicos que são buscados, além do problema que motivou a pesquisa e a justificativa do tema proposto, com todas suas delimitações.

No capítulo 2 estão apresentadas informações importantes presentes na literatura para fundamentar essa pesquisa, como os principais conceitos relacionados ao solo e suas classificações. Após isso é debatido um pouco sobre o conceito de estabilização de solos e algumas formas de estabilização de solos, assim como alguns estudos já realizados a respeito da estabilização de solos. Ademais, este capítulo aborda a região de estudo e a importância da carnaúba e alguns estudos de seus resíduos na pavimentação.

No capítulo 3 é debatido o programa experimental utilizado, apresentando um detalhamento de todas as técnicas e ensaios utilizados, tais como os materiais necessários para a pesquisa. No capítulo 4 estão apresentados os resultados, obtidos através do programa experimental, e acompanhado dos resultados estão as interpretações e análises dos dados obtidos. No capítulo 5 estão as conclusões relevantes do estudo. Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas que nortearam a pesquisa durante o processo de produção do estudo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

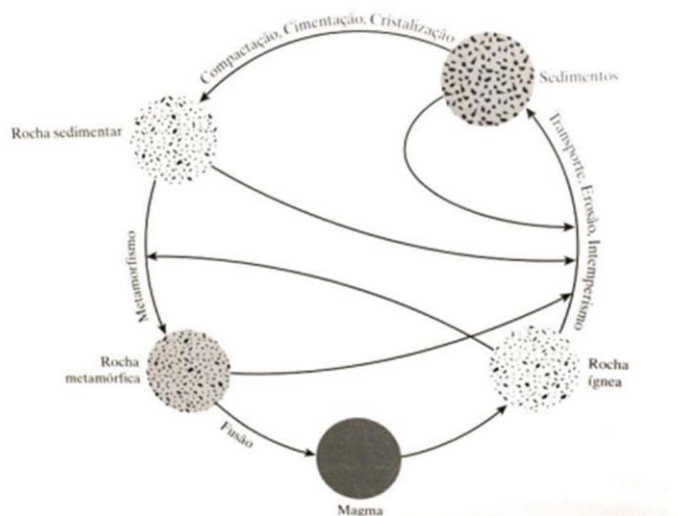
2.1 Definição de solos

Todos os solos originam-se a partir da decomposição de rochas através de um processo de intemperismo químico e físico. Os agentes físicos são oriundos da ação mecânica desagregadora, como variações de temperatura, transporte da água, do vento e ciclos de congelamento e derretimento, causando uma desintegração das rochas, porém, não alteram sua composição original (PINTOS, 2006; ORTIGÃO, 2007).

Os agentes químicos, como o próprio nome já diz, ocorre por vários processos químicos que alteram sua composição mineralógica. Os principais agentes do intemperismo químico são hidratação, hidrólise, lixiviação, troca de cátions, carbonatação, entre outros, que em série dão origem aos solos. O conjunto desses processos, são mais ativos em regiões de clima quente e úmido do que em climas frios, portanto, muito comum no Brasil. Os solos podem ser considerados como um sistema trifásico, pois divergem de acordo com seu tamanho, forma e composição química, e isso é intrínseco à composição química da rocha que lhe deu origem (PINTOS, 2006; ORTIGÃO, 2007).

Os solos que se depositam próximos à rocha que lhes deu origem são denominados de solos residuais; os demais são chamados de solos sedimentares ou transportados. Para compreender melhor o processo de formação do solo, é necessário entender o ciclo de formação e transformação das rochas, aos quais darão origem aos solos e suas características. Ao observar a Figura 1 é possível ter uma breve análise desse processo e cada elemento do ciclo.

Figura 1 - Ciclo das Rochas.



Fonte: Das (2007).

Segundo Uieno (2011), o solo é um material que ocorre em abundância na natureza. Além de ser muito utilizado na construção civil, é encontrado em demasia, tendo um custo baixo quando confrontado a outras matérias-primas da construção. Todas as obras de Engenharia Civil assentam-se sobre o terreno e, portanto, é requerido que o comportamento do solo seja devidamente considerado, de acordo com suas características e como ele se comporta diante das solicitações.

2.2 Classificação do solo

Pinto (2006) afirma que os solos possuem uma grande diversidade e com isso comportamentos totalmente distintos perante a solicitações de interesse da Engenharia. Sendo assim, a classificação dos solos surge como uma ferramenta para estimar o provável comportamento do solo e agrupá-lo de acordo com suas características, além de orientar o programa de investigação necessário para analisar um problema.

Das (2007) conclui que os solos diferentes com propriedades similares podem ser classificados em grupos e subgrupos com base no seu comportamento do ponto de vista da engenharia. Os sistemas de classificação fornecem uma linguagem comum para expressar as características gerais do solo, que são infinitamente variadas. O autor ainda afirma que hoje existem dois sistemas de classificação que são normalmente utilizados pelos engenheiros de solos e ambos levam em consideração a distribuição granulométrica e os limites de Atterberg, sendo o sistema de classificação da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) e o Sistema Unificado de Classificação dos Solos.

2.2.1 Sistema de Classificação da AASHTO

O sistema da AASHTO para classificação de solos foi desenvolvido em 1929 pela Administração de Estradas Públicas dos EUA. De acordo com este sistema, o solo é classificado em sete grupos principais: de A-1 a A-7. Este método baseia-se na composição granulométrica e nos limites de consistência. A Figura 2 apresenta o esquema do Sistema de Classificação da AASHTO (DAS,2007).

Figura 2 - Sistema de Classificação AASHTO.

		% P #10 2,0 mm	% P #40 0,42 mm	% P #200 0,075 mm	IP
% P #200 < 35	A-1a	< 50	< 30	< 15	< 6
	A-1b		< 50	< 25	< 6
	A-3		> 50	< 10	NP
	A-2				
% P #200 > 35	A-4				
	A-5				
	A-6				
	A-7-5				
	A-7-6				

Fonte: Pinto (2006).

Nesse sistema, realiza-se a classificação pela verificação da porcentagem de material passante na peneira nº 200, sendo considerados solos de granulação grossa os que têm menos de 35% passando nesta peneira. Esses são solos dos grupos A-1, A-2 e A-3. Os solos com mais de 35% passando na peneira nº 200 formam os grupos A-4, A-5, A-6 e A-7 e são considerados solos de granulação fina (PINTO, 2006).


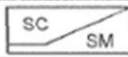
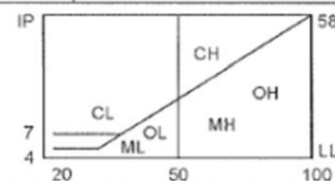
Segundo DNIT (2006) classifica que os solos dos grupos A-1, A-2 e A-3 possuem de excelente a bom para o comportamento no subleito, enquanto os grupos restantes são classificados de sofrível a mau para o comportamento no subleito.

2.2.2 Sistema de Unificado de Classificação de Solos

O Sistema Unificado de Classificação de Solos foi elaborado por Casagrande para obras de aeroporto e seu emprego acabou sendo generalizado. Nesse sistema, todos os solos são identificados pelo conjunto de duas letras que podem ser observadas na Figura 3. As cinco letras

a seguir designam o tipo predominante do solo e as outras quatro correspondem a dados complementares dos solos (PINTO, 2006).

Figura 3 - Terminologia do Sistema Unificado de Classificação.

% P #200 < 50	G > S : G	% P #200 < 5	GW CNU > 4 e 1 < CC < 3	
			GP CNU < 4 ou 1 > CC > 3	
		% P #200 > 12	GC 	
	S > G : S	5 < #200 < 12	GW-GC, GP-GM, etc.	
		% P #200 < 5	SW CNU > 6 e 1 < CC < 3	
		% P #200 > 12	SC 	
	5 < #200 < 12	SW-SC, SP-SC, etc.		
% P #200 > 50	C	CL		
		CH		
	M	ML		
		MH		
	O	OL		
		OH		

Fonte: PINTO (2006).

A classificação leva em consideração a composição granulométrica, os índices de consistência (Limite de Liquidez e Índice de Plasticidade) e os Coeficientes de Não Uniformidade (CNU) e de Curvatura (CC). A partir da realização dos ensaios específicos é possível obter os dados necessários para efetuar a classificação, conforme a Figura 4(PINTO, 2006).

Figura 4 - Sistema Unificado de Classificação.

G	pedregulho
S	areia
M	silte
C	argila
O	solo orgânico
W	bem graduado
P	mal graduado
H	alta compressibilidade
L	baixa compressibilidade
Pt	turfas

Fonte: Pinto (2006).

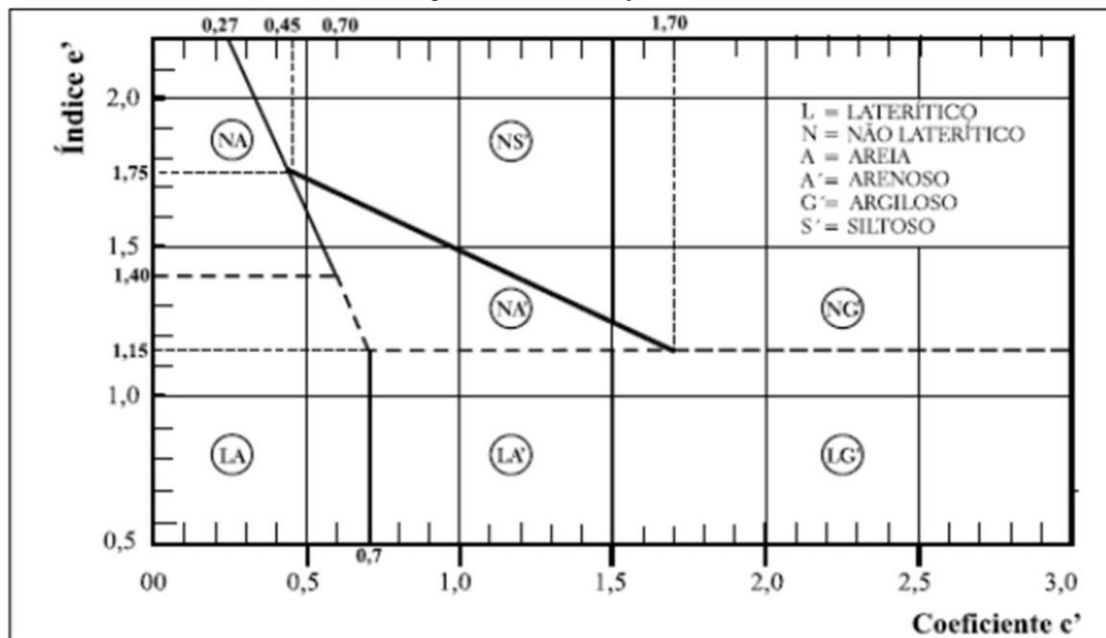
2.2.3 Classificação MCT

A classificação MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), elaborada por Nogami e Villibor (1981) permitiu o estudo geotécnico dos solos finos - aqueles que passam integralmente na peneira de malha de 2 mm. Grande parte dos solos brasileiros enquadra-se nesta situação, característica dos solos tropicais. Os solos brasileiros eram classificados de acordo com estudos realizados nos solos do hemisfério norte, que, em sua maioria, possuem granulometria grosseira e são classificados por meio de ensaios de granulometria, e Limite de Liquidez e Plasticidade (NOGAMI; VILLIBOR, 2009).

Os solos finos tropicais possuem uma elevada capacidade de suporte, mas, de acordo com as classificações tradicionais, eram classificados como inadequados para uso em pavimentos, pois os métodos de classificação levados em consideração eram de um ambiente diferente dos presentes em territórios tropicais (NOGAMI;VILLIBOR, 2009).

A classificação MCT possibilita determinar as características dos solos quanto ao seu comportamento laterítico e não laterítico, mensurando parâmetros importantes para sua utilização na pavimentação rodoviária (DNIT,2006). O ábaco mostrado na Figura 5 apresenta esta sistemática estabelecida por Nogami e Villibor.

Figura 5 - Classificação MCT.



Fonte: Nogami; Villibor (2009).

Vale salientar que para ser considerado solo tropical, este não deve necessariamente ter se desenvolvido na faixa de clima tropical úmida, mas sim, possuir particularidades de importância geotécnica (NOGAMI; VILLIBOR, 2009).

Um estudo realizado por Sousa (2019) analisou a caracterização geotécnica dos solos do Baixo Jaguaribe para o uso na pavimentação e observou em Russas ótimos resultados. O solo russano foi caracterizado como LA - areia laterítica - e nos ensaios de Mini CBR valores superiores a 30% foram encontrados, confirmando assim uma capacidade de suporte muito alta, sendo apropriados até para o uso de camadas superiores de pavimentos submetidos a tráfego leve e médio, exigindo espessuras pequenas para as camadas.

2.3 Estabilização de solos

A estabilização de solos consiste na melhoria e modificação das propriedades do material disponível, a fim de que se atenda aos requisitos de projeto. As propriedades de um solo podem ser alteradas por meios químicos, térmicos, mecânicos e outros. A escolha do tipo de estabilização em qualquer projeto depende em parte da natureza da estrutura e de suas propriedades geotécnicas e físico químicas envolvidas (NÚÑEZ, 1991).

Segundo Senço (2007) entre as características que um solo estabilizado deve apresentar ressaltam-se a resistência ao cisalhamento e a resistência à deformação. A condição de resistência ao cisalhamento refere-se à capacidade de resistir às tensões oriundas da passagem de veículos, sem se romper e dentro do limite de deformações.

Cristelo (2001) afirma que a estabilização de solos sempre foi utilizada na execução de pavimentos, em alguns casos os materiais naturais que cumprem os requisitos de projetos não são economicamente viáveis para seu transporte, implicando então no melhoramento das capacidades mecânicas dos solos locais.

Ainda, Cristelo (2001) afirma que existem três grupos de métodos de estabilização de solos: método de estabilização mecânica, nos quais se procura melhorar as características do solo através de uma melhor acomodação das suas partículas constituintes; método da estabilização física, nos quais se alteram as propriedades do solo através da ação da eletricidade, calor, entre outros; método de estabilização química, que modificam permanentemente as propriedades dos solos através de aditivos.

O presente trabalho focou apenas na estabilização química, tendo em vista que o processo utilizado para a estabilização do solo será por um método químico. Segundo Teixeira

(2010), os materiais mais utilizados para a estabilização de solos em obras rodoviárias são a cal, o cimento e o betume.

2.3.1 Estabilização de solos com cimento

Segundo Cristelo (2001) o cimento é um dos aditivos mais conhecidos e aplicados na estabilização química de solo, podendo ser utilizado tanto em solos poucos plásticos ou não plásticos. Ele ressalta ainda que o principal motivo da utilização do cimento é a melhoria das características mecânicas e uma maior estabilidade à variação do teor de água. A presença de sílica (SiO_2) e de alumina (Al_2O_3) tem importância fundamental na obtenção de produtos com elevadas resistências (COUTINHO, 1973).

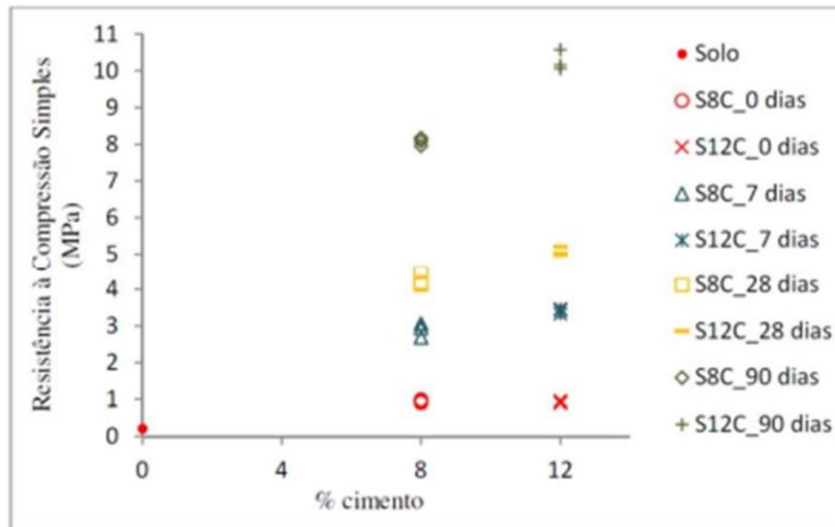
Na estabilização com cimento, Concha (1986) afirma que ocorrem reações químicas do cimento hidratado, no qual são desenvolvidos vínculos químicos entre a superfície do grão de cimento hidratado e a parte da partícula de solo em contato com o grão de cimento. O processo de estabilização de solos com o cimento Portland constitui-se na pulverização de cimento e água em um solo. A mistura é, então, compactada e permanece no processo de hidratação durante 7 dias (PEIXOTO; NUNES; AFFONSO, 2001).

A estabilização com cimento Portland vem sendo utilizada desde 1915 nos Estados Unidos, na construção de bases, sub-bases e subleitos de pavimentos rodoviários. Uma das vantagens do cimento é o fato de poder ser aplicado em diversos tipos de solos como os granulares, siltosos e argilosos (ZHANG; TAO, 2008).

Segundo Cristelo (2001) o processo de preparação para a estabilização com o cimento consiste na mistura de solo finamente pulverizado, cimento e água, em proporções previamente determinadas. Normalmente a percentagem situa-se entre os 5 e 7% nos siltes, 7 a 15% nas areias e cerca de 4% em cascalhos. Ademais, Catton (1962) afirma que o comportamento de pavimentos com solo-cimento é governado por três fatores básicos: o teor de umidade, a densidade e a quantidade de cimento.

Dias (2012) elaborou um estudo para tratamento de solo cimento objetivando obter melhores características mecânicas. O solo analisado foi do tipo silto-argiloso, onde foram adicionado cimento com percentuais de 8% (S8C) e 12% (S12C). Os resultados revelaram que por se tratar de uma mistura com cimento, a resistência continuou crescendo mesmo após o período de 28 dias normalmente estimados para um material pozolânico. A Figura 6 apresenta os resultados obtidos.

Figura 6 - Resistência à compressão simples do solo estabilizado com cimento.



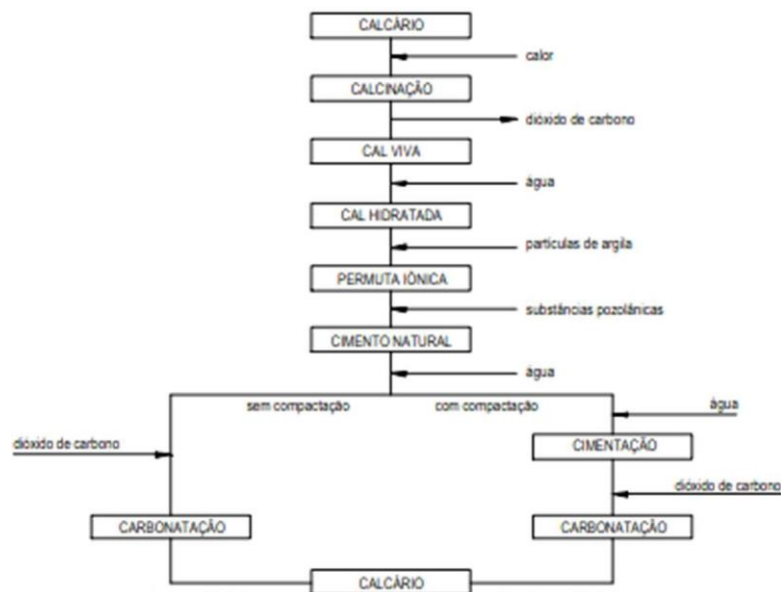
Fonte: Dias (2012).

2.3.2 Estabilização de solos com cal

A utilização da cal como agente estabilizador de solos é o método mais antigo de estabilização química conhecida. A cal empregada para a estabilização de solos é o produto oriundo da calcinação de rochas carbonatadas cálcicas ou magnesianas (dolomíticas), a uma temperatura próxima de 1000°C (GUIMARÃES, 2002). Durante esse processo ocorre a transformação do carbonato de cálcio em óxido de cálcio e a liberação de anidrido carbônico (CRISTELO, 2001).

Segundo Cristelo (2001) quando a temperatura se mantém entre 900°C e 1200°C o produto final corresponde ao que correntemente se designa por cal aérea, com estrutura romboédrica e altíssima porosidade. Tanto a calcítica quanto a dolomítica são obtidas a partir da cal aérea, o que difere uma da outra é o teor de óxido magnésio presente na sua constituição (CRISTELO, 2001). A Figura 7 apresenta as principais reações físico-químicas que ocorrem em um solo estabilizado com cal.

Figura 7 - Esquema das principais reações físico-químicas que ocorrem num solo tratado com cal.



Fonte: Cristelo (2001).

Senço (2007) afirma que o uso da cal na estabilização de solos trata-se de um processo de recuperação de um solo que não possui condições tecnológicas ou econômicas para ser estabilizado. E conclui que se devidamente homogeneizada, compactada e recoberta com uma camada de rolamento, suporta as cargas oriundas do tráfego e boas condições de distribuição das cargas. Por fim, segundo Santos (2004) a resistência à compressão cresce linearmente com o aumento da proporção de cal até certo nível, usualmente 8% para solos argilosos e exponencialmente com a redução da porosidade da mistura.

2.3.3 Estabilização de solos com Emulsões Asfálticas

De uma forma geral, a estabilização betuminosa é um método de construção em que o material betuminoso (emulsões asfálticas) é acrescentado ao solo, ou à mistura de solos, buscando a melhoria de suas características (SENÇO, 2001). Bernucci et al (2008) definem ainda as emulsões asfálticas como misturas homogêneas de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) e água, estabilizadas com agentes emulsificantes.

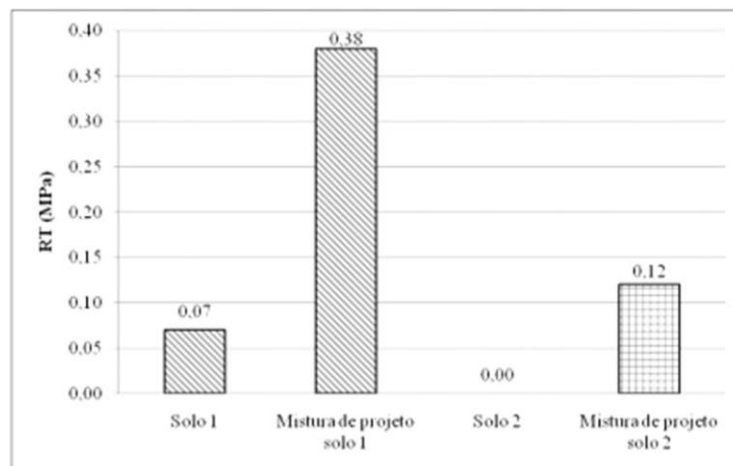
De acordo com Suarez (2008) apud Leon (2015), a estabilização asfáltica foi desenvolvida durante a 2ª Guerra Mundial a partir de pesquisas para a construção de aeroportos

e rodovias. No Brasil, o primeiro trecho de solo-emulsão foi construído no estado de São Paulo na década de 1960.

Segundo Kézdi (1979), o emulsificante presente na emulsão empregada para estabilizar o solo deve agir com a superfície mineral dos grãos. Jacintho (2005) afirma que a velocidade de ruptura da emulsão é escolhida de acordo com a superfície e características químicas do solo. Pacheco (2011) conclui afirmando que quando a emulsão rompe rapidamente pode ser que não haja uma mistura adequada entre o solo e o betume, obtendo assim uma estabilização deficiente. E afirma que se deve optar apenas por emulsões de ruptura média e lenta para o solo-emulsão.

Pacheco (2011) realizou estudos para verificar o comportamento do pavimento com estabilização asfáltica, e, para isso, analisou duas amostras de solos diferentes. O solo 1 (solo fino) possuía 3,54% de CAP residual e 12,56% de água, já o solo 2 (solo granular) possuía 2,84% de CAP residual e 9,96% de água. Quando analisada a Resistência à Tração (RT) seca aos sete dias, através do ensaio de compressão diametral, para as misturas de solos 1 e 2 comparada às resistências dos solos puros compactados na umidade ótima, obteve-se o seguinte resultado, como apresenta a Figura 8.

Figura 8 - Comparativo das Resistências à tração.



Fonte: Pacheco (2011).

A estabilização do solo 1 com emulsão asfáltica resultou em um aumento de 442,9% da RT. O solo 2 obteve um ganho de resistência após a adição de emulsão, visto que não havia esta propriedade no solo puro. O solo 1 apresenta uma parcela de argila, que é um agente cimentante, por isso possui uma resistência a tração maior que o solo 2, que é um material mais graúdo, não possuindo esta propriedade aglutinante (PACHECO, 2011).

2.3.4 Estabilização de solos com Material Alternativo

Muitos estudos foram realizados para a estabilização química de solos com materiais alternativos nas últimas décadas no Brasil. A Política Nacional de Resíduos Sólidos, através da Lei 12.305 de 2010, responsabiliza o setor gerador pela busca de soluções de reciclagem de resíduos, bem como a resolução CONAMA 307 de 2002 que obriga a implantação de uma proposta para minimizar impactos ambientais.

Segundo Tavares et. al (2011) a pavimentação consome um elevado volume de materiais, sendo grande parte disto composta por agregados. Com base nisso, ele afirma que alguns resíduos podem ser reutilizados, reprocessados ou reciclados para constituírem material para a construção de pavimentos. Por fim, Castelo Branco (2004) acrescenta que a construção de rodovias representa um terço da demanda por agregados. Com isso é possível concluir que o emprego de resíduos na pavimentação mostra-se uma aplicação fascinante e extremamente congruente.

2.3.4.1 Estabilização de solos com Cinza Volante

Freitas (2018) afirma que as cinzas sempre estiveram presente no cotidiano do ser humano, seja pela queima de um cigarro, seja pela queima do lixo produzido de forma inadequada. Mas foi a revolução industrial a responsável pelo crescimento desordenado da quantidade de cinzas produzidas pelas indústrias, seja pela queima de produtos para geração de energia, seja pela confecção do ferro, aço e alumínio.

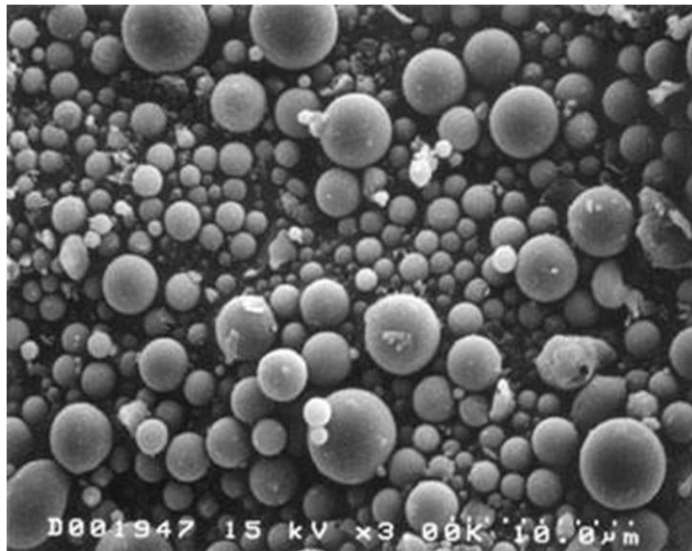
De acordo com os dados do Balanço Energético Nacional de 2019, com dados referentes a 2018, 5,8% da oferta de energia foi derivada da combustão de carvão mineral (EPE, 2019). Com base nos dados de Rhode et al. (2006), corresponde a uma produção que atinge aproximadamente 4.000.000 de toneladas por ano de cinza volante. Parte dessas cinzas, do tipo volante, é utilizada na fabricação do cimento pozolânico, mas grande parte ainda é estocada no solo, sem possuir destinação final (SILVA et al., 1997).

A cinza volante é formada por partículas extremamente finas e leves, originadas da combustão de carvão das usinas termelétricas. Rhode et al. (2006) conceituam quimicamente as cinzas volantes como materiais particulados, silicoaluminosos, de textura siltosa e com massa específica dos grãos variando entre 2050 kg/m³ e 2200 kg/m³. Barros (2015) afirma que a composição granulométrica das cinzas volantes se situa geralmente, entre 5 e 200 μm , com

um tamanho médio de 30 a 50 μm . Portanto, não precisa ser sujeita à trituração antes de ser utilizada.

Segundo Kihara (1983) a composição química das cinzas volantes está relacionada, principalmente, à composição mineralógica e procedência do carvão. Ele afirma que cinzas volantes de uma mesma termelétrica não apresentam, de um modo geral, variações significativas entre si. A composição química é bastante variável: sílica (30 - 55%), alumina (15 - 40%), ferro (5 - 14%), cálcio (1 - 15%), sódio (0,1 - 1,5%), potássio (0,2 - 3,6%), magnésio (1 - 5%) (FHWA,2020). A Figura 9 apresenta a forma das partículas de cinzas volantes.

Figura 9 - Partículas de Cinzas Volantes com ampliação de 2000x.



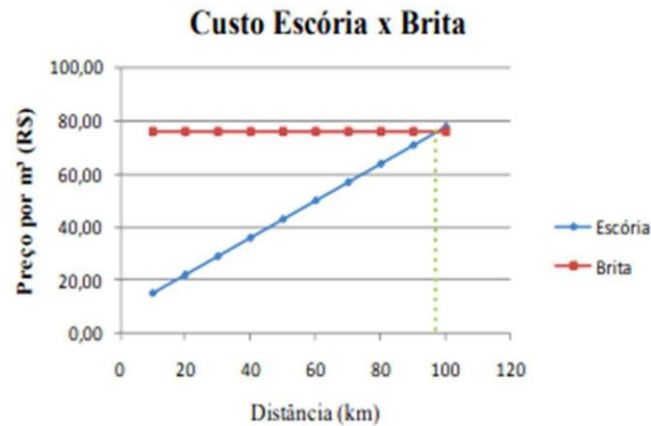
Fonte: FHWA (2020).

2.3.4.2 Estabilização de solos com Escória Aciaria

De acordo com Fernandes (2010), o Brasil está entre os vinte maiores produtores de aço bruto do mundo, com 3,7 % de toda a produção mundial no ano de 2003 e que não se pode omitir o impacto ambiental gerado pelas atividades siderúrgicas. Com base nisso ele conclui que é necessário buscar soluções tecnológicas que visem minimizar os impactos ambientais por elas gerados.

Tavares et al. (2011) afirmam que as escórias de aciaria são geradas a partir da fusão de metais ou da redução de minérios que objetivam obter o ferro gusa líquido, e posteriormente o aço. Durante esse processo de produção o aço torna-se frágil, quebradiço e difícil de ser transformado em barras. Para compreendermos melhor o comportamento das escórias de aciaria é preciso o conhecimento dos processos de fabricação do aço.

Figura 12 - Comparação do preço da escória e da brita pela distância do estudo.



Fonte: Tavares (2011)

Tavares et. al. (2011) concluiu que a utilização do agregado siderúrgico possibilitou valores superiores de módulo de resiliência e resistência à tração se comparados a outras misturas SMA que utilizam agregados naturais, além do agregado siderúrgico ter apresentado valores satisfatórios de abrasão Los Angeles, fator crucial para misturas do tipo SMA, pois é necessário uma alta interação grão-grão e boa resistência para os grãos não fragmentarem.

2.3.4.3 Estabilização de solos com Cinzas da Casca de Arroz

Oliveira et al. (2018) define a casca de arroz como um resíduo agroindustrial que adequadamente queimada e moída, pode se tornar uma importante pozolana a ser adicionada em argamassas. Quispe et al. (2017) afirma que aproximadamente 134 milhões de toneladas de casca de arroz são produzidas anualmente no mundo, das quais 90% são queimadas ao ar livre ou descarregadas em rios e oceanos para descartá-las. Por fim, segundo Chungsangunsit (2004), apud Silva (2012), a casca de arroz representa 20% do peso do arroz total. Sabendo disso, conforme a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2019), a produção de arroz na safra de 2017/2018 no Brasil foi de 12.064,20 mil toneladas, portanto, mais de 2 mil toneladas nesta safra são de casca de arroz. Sendo assim, evidencia-se a importância da elaboração de pesquisas para reutilizar esse material como estabilizantes de solos.

Alcântara (2017) classifica a casca de arroz como um material com bom grau de pozolanicidade, detectando seu comportamento semelhante para o caso das cinzas amorfas com relação à micro-sílica. A Cinza da Casca de Arroz (CCA) é rica em sílica (SiO), podendo ser utilizada na indústria cerâmica e na construção civil. A adição de CCA apresenta duas

vantagens: Melhora as propriedades físicas e mecânicas dos solos, qualificando seu uso como materiais em pavimentos (BEHAK 2007).

Segundo Chaves et al. (2009), apud Freitas (2018), a composição química da CCA varia em função do solo em que o arroz é plantado, dos tipos e teores de fertilizantes, das condições climáticas, bem como do tipo de arroz propriamente dito. Behak (2007) reuniu estudos que analisaram diferentes composições químicas da CCA, como visto na Figura 13, que elucida os resultados obtidos.

Figura 13 - Composição química de várias cinzas de casca de arroz.

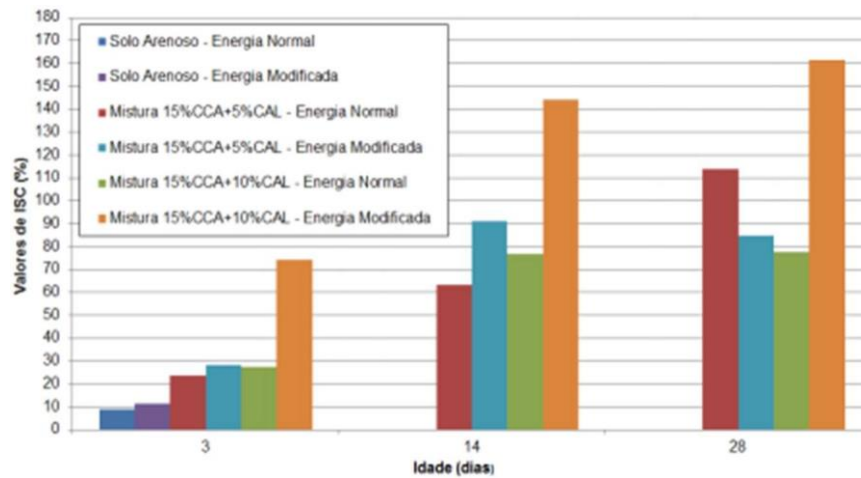
Composição química (%)	Korisa (1958)		Lazaro e Moh (1970)	Basha et al. (2003)	Rodriguez (2002)
	Mostra 1	Mostra 2			
Silica (SiO ₂)	94,5	93,5	88,6	93,15	87,2
Oxido de Cálcio (CaO)	0,25	2,28	0,75	0,41	0,55
Oxido de Magnésio (MgO)	0,23	---	3,53	0,45	0,35
Oxido de Sódio (Na ₂ O)	0,78	---	---	---	1,12
Potássio (K ₂ O)	1,10	3,15	---	2,31	3,60
Oxido de Ferro (Fe ₂ O ₃)	traços	1,01	0,36	0,21	0,16
Oxido Fosfórico (P ₂ O ₅)	0,53	---	---	---	---
Alumina (Al ₂ O ₃)	traços	traços	1,48	0,21	0,15
Oxido de Manganês (MnO ₂)	traços	traços	---	---	---
Dióxido de Carbono (CO ₂)	---	---	0,51	---	---

Fonte: Behak (2007).

Bonfante (2016) realizou um estudo para analisar a viabilidade do uso da CCA e cal para estabilizar um solo arenoso, tendo em vista que areias e solos arenosos possuem pouca atividade pozolânica frente à cal, portanto, não reagindo bem a estabilização com esse material. Por isso, os solos granulares são estabilizados classicamente com cimento, mas isso implica em um alto custo final. Sendo assim, em seu estudo, Bonfante (2016) adotou duas misturas para analisar as combinações e quais resultados seriam obtidos. A primeira mistura era composta por 80% de solo arenoso, 15% de CCA e 5% de cal, nomeada de 15%CCA+5%Cal. A segunda mistura era composta por 75% de solo arenoso, 15% de CCA e 10% de cal, denominada de 15%CCA+10%Cal.

Com base nas misturas existentes ele buscou determinar o Índice de Suporte Califórnia (ISC), a diversas idades, do solo arenoso com a CCA e cal, e analisar se era possível sua utilização nos pavimentos. A Figura 14 elucida os resultados obtidos por Bonfante (2016).

Figura 14 - Valores de ISC.



Fonte: Bonfante (2016)

Concluiu-se então que o incremento do ISC do solo arenoso é significativo. O resultado do incremento deve-se às reações pozolânicas entre a sílica presente na CCA e a cal, melhorando a capacidade de suporte do solo estabilizado. E junto a isso contribui para a preservação do meio ambiente, reduzindo a exploração de jazidas de solo e rocha.

2.3.4.4 Estabilização de solos com cinzas de bagaço de cana-de-açúcar

Segundo Silva et al. (2020) o Brasil lidera o setor de biocombustíveis e está entre os maiores produtores globais de açúcar, sendo assim as empresas sucroalcooleiras têm grandes demandas. De acordo com a CONAB (2019), a produção de cana-de-açúcar na safra de 2018/2019 foi de cerca de 620,43 milhões de toneladas. De acordo com Cordeiro (2006), apud Souto (2010), para cada tonelada de cana-de-açúcar colhida e processada na indústria sucroalcooleira, são gerados aproximadamente 26% de bagaço (umidade de 50%) e 0,62% de cinza residual. Portanto, com base nesse diagnóstico, só na safra de 2018/2019 foram gerados mais de 3,84 milhões de toneladas de Cinza de Bagaço de Cana (CBC).

Souto (2010) afirma que a CBC apresenta, em termos de óxidos, uma grande quantidade de dióxido de silício (silicatos), normalmente com índices superiores a 60% (em massa). Devido a este fato a CBC possui um alto potencial para ser utilizada como adição mineral, substituindo parte do cimento em argamassas e concretos (CORDEIRO et al., 2008).

Devido ao fato de apresentar altos índices de sílica, pode ser utilizada como pozolanas. A pozolana possui a capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio, formando

compostos estáveis de poder aglomerante, por exemplo os silicatos e aluminatos de cálcio hidratados (OLIVEIRA et al., 2004 apud PAULA et al., 2008).

Silva et al. (2020) realizou experimentos visando utilizar a cinza como uma adição no uso de solo cimento, diminuindo de forma parcial o consumo de cimento Portland, para a aplicação em pavimentação rodoviária como camadas de base e sub base para Rodovias de Baixo Volume de Tráfego (RBVT).

Para realizar a caracterização do solo, ele utilizou ensaios de compactação, umidade higroscópica e ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC). Foram elaboradas 5 amostras de solo. A primeira amostra de solo, era solo puro. A segunda amostra de solo-cimento (solo com 8% de Cimento Portland). A terceira, quarta e quinta amostra eram misturas de solo-cimento com CBC em 3 quantidades diferentes, sendo elas 25%, 35% e 50%, respectivamente.

A CBC ostentou resultados satisfatórios como forma de substituição parcial do cimento Portland, por se comportar como um material pozolânico. Os ensaios de ISC demonstraram que somente a amostra com 50% de CBC atenderia ao uso como material para bases, já as amostras de 25% e 35% de CBC serviriam para o uso como sub-bases em pavimentos para RBVT. A Figura 15 exibe os resultados obtidos nos experimentos.

Figura 15 - Teores obtidos para a expansão e o ISC para todas as amostras.

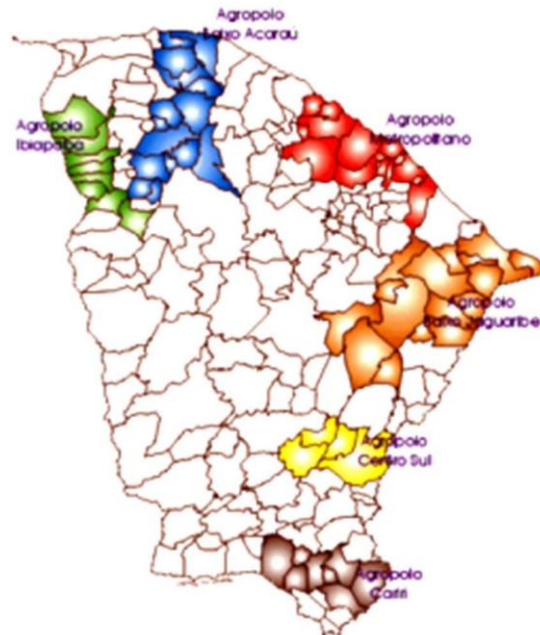
Amostras	Expansão (%)	ISC (%)
SOLO PURO	0,53	13,0
SOLO CIMENTO (0%* CBC)	0,68	69,0
SOLO CIMENTO + 25%* CBC	0,76	64,0
SOLO CIMENTO + 35%* CBC	1,02	60,0
SOLO CIMENTO + 50%* CBC	0,42	53,0

Fonte: Silva (2020)

2.4 Agropolo Baixo Jaguaribe e a importância da carnaúba

Segundo Gondim (2008) o Governo do Estado do Ceará lançou em 1998, o projeto Agropolos, visando a promoção de atividades agroindustriais. Nesse ano foram implantados seis agropolos do estado: Ibiapaba, Baixo Acaraú, Metropolitano, Baixo Jaguaribe, Centro-Sul e Cariri, como ilustrados na Figura 16.

Figura 16 - Mapa do Estado Ceará com destaque nos Agropolos.



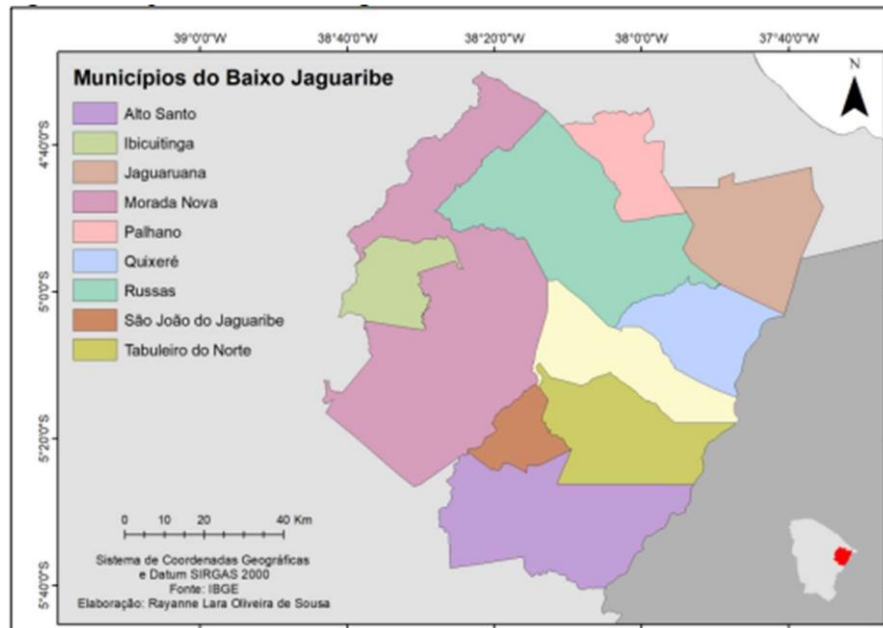
Fonte: Girão (2000).

O Agropolo do Baixo Jaguaribe possui uma disponibilidade de terras favoráveis à sua exploração e aliado a isso uma abundância de mão-de-obra, além da proximidade dos principais mercados consumidores do Nordeste do Brasil. Devido isso, o Agropolo do Baixo Jaguaribe detém 37% da área total irrigada do Estado do Ceará (RABÊLO, 2006 apud GONDIM, 2008).

A microrregião do Baixo Jaguaribe contém umas das áreas mais estratégicas do Estado do Ceará, pois além de suas características naturais, a região possui uma boa localização, pois interliga-se aos principais centros consumidores do Nordeste pelas rodovias federais e estaduais, dentre essas rodovias está uma das rodovias mais importantes do país, a BR - 116 (CHAVES; ARAÚJO; 2009).

Segundo Sousa (2019) o Baixo Jaguaribe possui uma área de mais de 9940 km² que corresponde a 6,68% da área total do estado. É composta pelos municípios de Alto Santo, Ibiçuitinga, Jaguaruana, Limoeiro do Norte, Morada Nova, Palhano, Quixeré, Russas, São João do Jaguaribe e Tabuleiro do Norte. Conforme a Figura 17 é possível compreendermos o mapa político da região.

Figura 17 - Mapa Político do Baixo Jaguaribe.



Fonte: Sousa (2019).

Segundo Araújo (2016) o Baixo Jaguaribe vem passando uma forte transformação na base técnica de sua agropecuária com a incorporação de ciência, tecnologia e informação, com vistas a aumentar a produtividade. Todo esse processo pode ser percebido com a grande expansão da produção de frutas frescas *in natura* para exportação.

Devido a esse processo de desenvolvimento no Baixo Jaguaribe, a produção de frutas possui o cenário mais importante dessa região, com exportações que configuram valores anuais de US\$ 30 milhões (CHAVES; ARAÚJO; 2009). Porém, não é apenas as frutas que possuem destaque na região, a carnaúba constitui um produto relevante. De acordo com a Plataforma Data Viva (2018) a cera de carnaúba correspondeu ao principal produto exportado do Baixo Jaguaribe em 2018, gerando uma receita de US\$ 20 milhões.

A importância da carnaúba não é de hoje. A exploração da cera se destinava no começo à fabricação de velas, porém, com o passar dos tempos foi sendo empregada em larga escala na indústria de cosméticos, na fabricação de ceras de polimentos, entre outros. No fim do século XIX, a carnaúba se consolida e firma o produto como alto valor para o comércio exterior, sendo responsável por 40% da balança comercial do estado, na década de 40 (D'ALVA, 2008 apud SOUZA, 2011).

Segundo Feitosa (2015), a carnaubeira (*Copernicia prunifera*) é uma planta nativa do semiárido do nordeste brasileiro, com maior ocorrência nos estados do Ceará, Piauí e Rio Grande do Norte. Em condições normais, cresce cerca de 30 cm por ano, em média, atingindo

a maturidade (primeira floração) entre 12 e 15 anos. Geralmente ela é encontrada em regiões limítrofes a rios, priorizando solos argilosos, aluviais e além disso possui uma alta capacidade de adaptar-se a longos períodos de alagamentos durante os períodos chuvosos (DUQUE, 2004).

O principal produto da carnaúba é sua cera. A cera é obtida a partir do corte da palha feito por um vareiro, que com o auxílio de uma vara comprida com uma foice bem amolada presa na ponta, corta o talo da folha. Após a colheita, leva-se para a secagem que pode ser realizada no chão batido (método tradicional), no estaleiro ou secador solar. Vale salientar que o secador solar é o melhor dentre as três opções e aumenta a produção da cera, além de ser uma cera de melhor qualidade. A Figura 18 demonstra o rendimento de cera e a produção do pó de acordo com a secagem utilizada.

Figura 18 - Processo de secagem da palha da carnaubeira.

ESPECIFICAÇÃO	UN	TIPOS DE SECAGEM DA PALHA		
		CHÃO BATIDO	ESTALEIRO	SECADOR SOLAR
PRODUÇÃO DE PÓ	kg*	5,5	6,3	7,2
RENDIMENTO DE CERA	kg	3,5	4,0	6,6
RENDIMENTO	%	64	74	92

Fonte: Da Carnaúba (2009).

Após a secagem as palhas são batidas e o pó deposita-se no chão. O pó é recolhido e passa por um processo de cozimento em água para evitar a queima e perda da cera. Após a fusão da cera, coa-se com o auxílio de uma prensa de madeira. Nas indústrias esse processo é substituído por extração à base de solventes. Após a fusão inicia-se a etapa do resfriamento e em seguida o produto é quebrado em pedras de cor amarelo esverdeado ou marrom escura (Cera Bruta). Após o processo completado, a cera passa pelas etapas de centrifugação, filtração, clareamento e embalagem final. Essas etapas asseguram a pureza e a qualidade das variedades oferecidas no mercado.

Segundo D'Alva (2008), o processo produtivo da cera de carnaúba envolve três conjuntos de atividades produtivas: extrativismo, beneficiamento e processamento industrial, além de atividades comerciais e financeiras desempenhadas por diferentes atores. A Figura 19 ilustra essa pirâmide do processo produtivo.

Figura 19 - Atores sociais no processo produtivo da Carnaúba.



Fonte: D'Alva (2008).

2.5 Uso da carnaúba na pavimentação

A utilização de rejeitos da carnaúba na pavimentação ainda é muito recente. Poucos estudos foram realizados, porém com ótimos resultados obtidos. Oliveira et al. (2018) realizou um estudo para avaliar o uso da adição de cinza de carvão mineral com a cera de carnaúba em um ligante asfáltico, buscando reduzir a temperatura de usinagem e compactação. A cera de carnaúba utilizada é denominada de cera de carnaúba tipo 4 (CT4) - cera bruta de coloração castanha escura, verde escura e/ou escura tendendo a negro.

O estudo utilizou uma proporção de 25% de cinza e 75% de cera em relação ao peso do ligante para a produção do aditivo utilizado no CAP modificado. O aditivo desenvolvido obteve resultados satisfatórios, reduzindo a temperatura de usinagem em 5,3 °C e a temperatura de compactação em 4,2 °C se comparado ao ligante puro, dando assim uma finalidade para o rejeito industrial e reduzindo o gasto energético. A Figura 20, expõe os resultados obtidos por Oliveira et al. (2018) em seu estudo.

Figura 20 - Caracterização dos ligantes Puro e Modificado.

Parâmetros	CAP Puro (50/70)	CAP Modificado	Limites (ANP)
Penetração - 25°C (d ₅₀)	57,3	27	50 a 70
Ponto de Amolecimento (°C)	48	65,5	Min. 46
T. Usinagem (°C)	155,3	150,0	Máx. 177
T. Compactação (°C)	143,0	138,8	Máx. 177
Viscosidade Brookfield 135°C (P)	0,400	0,328	Min. 0,274
Índice de Susceptibilidade Térmica – IST	-1,4	0,3	-1,5 a +0,7

Fonte: Oliveira et al. (2018).

Outro estudo realizado por Feitosa (2015) analisou a viabilidade de quatro tipos de ceras de carnaúbas do tipo 1, 2, 3 e 4 para a obtenção de misturas asfálticas mornas. As ceras foram empregadas no ligante asfáltico 50/70 e como forma de avaliar os efeitos causados pelo ligante modificado, optou-se por analisar a penetração, ponto de amolecimento, dentre outros ensaios. Para todas as misturas utilizou-se diferentes proporções, sendo elas de 3% e 5% em massa dos ligantes.

Os quatro tipos de cera utilizados variam de acordo com a sua porcentagem de impurezas, umidade presente e a sua coloração. A cera do tipo 1 tem no máximo 1% de impurezas e até 2% de umidade e sua coloração é amarelo claro. A cera do tipo 2 tem uma porcentagem máxima de 1% de impurezas e até 2% de umidade e coloração amarela. Já a cera do tipo 3 contém no máximo 2% de impurezas e até 2% de umidade e cor castanha. E por fim, a cera do tipo 4 com coloração verde escura e contendo no máximo 2% de impurezas e até 2% de umidade. A Figura 21 demonstra os valores obtidos para as temperaturas de usinagem e compactação das amostras utilizadas.

Figura 21 - Valores encontrados para as TUC das amostras de ligantes asfáltico puro e modificado.

Amostra	TU (°C)	TC (°C)
LA	155-161	145-150
LA 3 CT1	155-161	145-149
LA 5 CT1	151-157	140-145
LA 3 CT2	157-162	145-149
LA 5 CT2	150-156	139-144
LA 3 CT3	152-157	141-146
LA 5 CT3	151-157	141-145
LA 3 CT4	159-166	147-152
LA 5 CT4	145-151	135-140

Fonte: Feitosa (2015).

Dentre todas as misturas, o tipo 4 foi o que apresentou melhores resultados. O ligante modificado com a cera do tipo 4 apresentou uma considerável redução de 10°C na temperatura de usinagem e com isso uma redução das emissões e também um menor consumo energético. O tipo 4 demonstrou também um maior potencial para a aplicação em temperaturas mais baixas que o ligante puro, além de uma maior resistência a trincas térmicas. Por fim, com os ensaios mecânicos indicam que o ligante modificado com a cera do tipo 4 apresentou maior resistência à deformação permanente durante a vida de serviço do revestimento, se comparado ao ligante não modificado.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

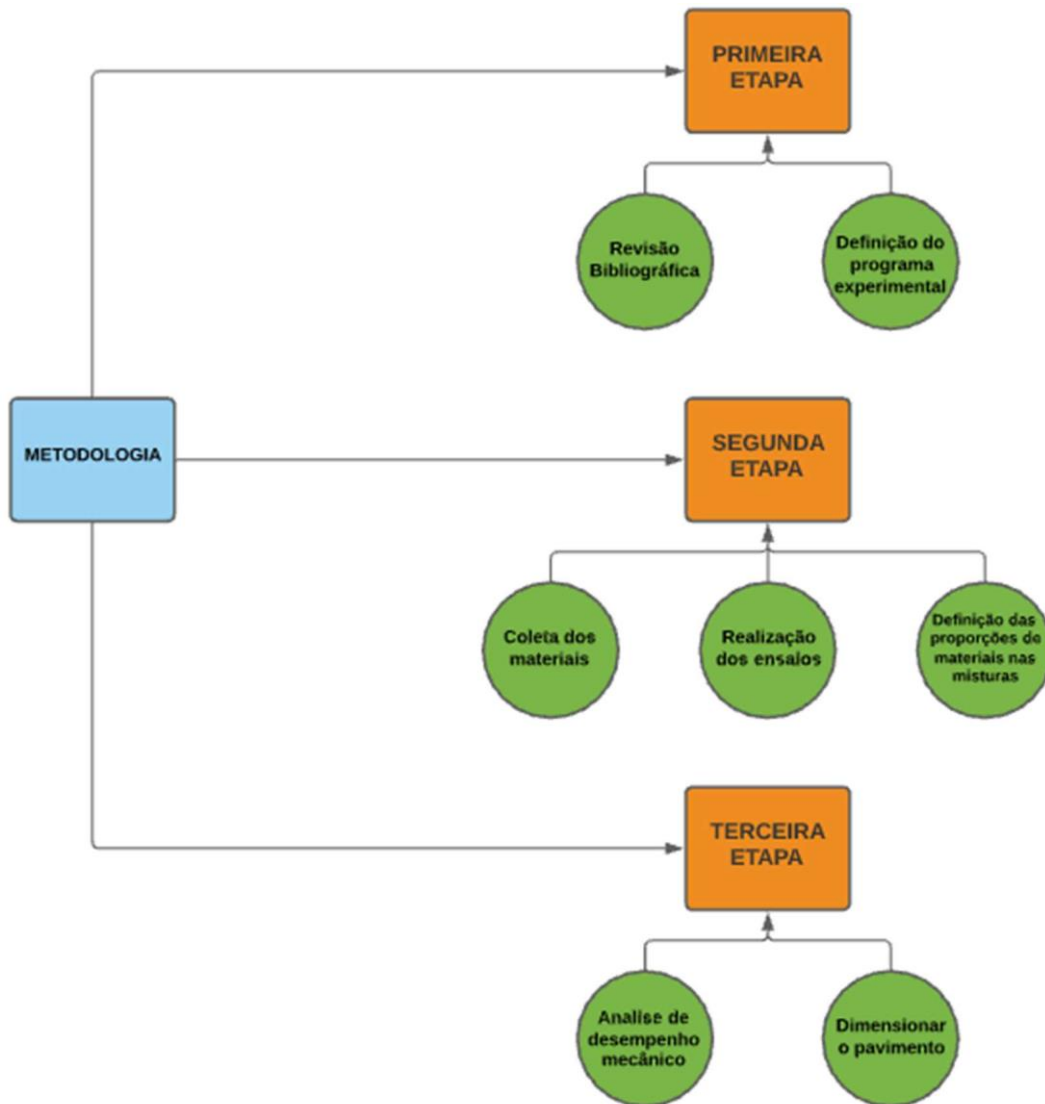
3.1 Considerações Iniciais

A metodologia utilizada nessa pesquisa foi realizada em algumas etapas. Inicialmente foi feita a revisão de literatura sobre o problema estudado. Após a conclusão da revisão bibliográfica foi realizada a coleta de amostras de solos e bagana, e a caracterização do solo através de ensaios laboratoriais. As misturas de solo com diferentes porcentagens pré-determinadas de bagana-solo e bagana-solo-cimento foram submetidas a ensaios geotécnicos. Dos resultados obtidos comparam-se suas propriedades para a aplicação no pavimento e foi feita ainda uma análise da viabilidade econômica.

Sendo assim, estão apresentados neste capítulo todos os materiais utilizados durante a pesquisa, sendo estes, a bagana, proveniente da Agrocera Indústria Comércio e Exportação de Cera Vegetal LTDA, localizada no município de Russas, um solo proveniente também da cidade de Russas, localizado na Jazida municipal e, por fim, o cimento CP II E 32 RS. Em seguida, está apresentada a metodologia aplicada para que os objetivos propostos fossem alcançados, tal como o programa experimental utilizado. Os ensaios laboratoriais foram realizados no Laboratório de Solos e Materiais, pertencente à Universidade Federal do Ceará (UFC) - Campus Russas.

Neste estudo, foram testadas diferentes porcentagens de bagana como forma de estabilizante para solos utilizados em pavimentos rodoviários, e também a combinação da bagana com solo e cimento e analisar os possíveis ganhos de resistência e se é possível a sua utilização nas camadas dos pavimentos. A Figura 22 apresenta um fluxograma que elenca as atividades realizadas e em que etapas elas estão enquadradas.

Figura 22 - Fluxograma metodológico.



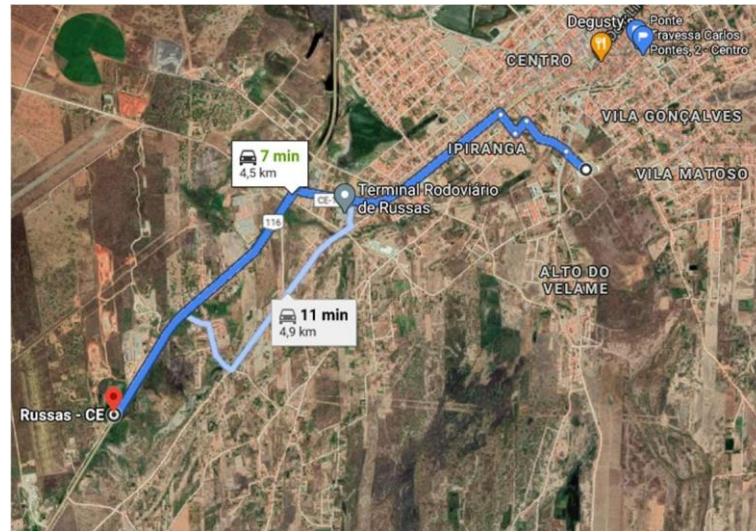
Fonte: Autor (2021).

3.2 Materiais

3.2.1 Solo

A extração do solo foi realizada na jazida de solos Municipal de Russas. A jazida existente é bastante utilizada para o uso em estrutura de pavimentos de rodovias, porém, não existe nenhum histórico de estudos geotécnicos com solos realizados nessa jazida. A jazida escolhida encontra-se nas coordenadas geográficas 4°57'42.4"S e 38°00'13.3"W e está localizada a 4,5 km de distância da Universidade Federal do Ceará (UFC) - Campus Russas, conforme ilustrado na Figura 23.

Figura 23 - Localização da jazida municipal em relação ao campus de Russas.



Fonte: Google Maps (2021).

O material se encontrava em estado solto, permitindo assim a coleta de amostras de forma manual, utilizando-se pás, e para o seu transporte optou-se pelo uso de baldes de 20 kg. Para iniciar a preparação da amostra de solo é necessário primeiro realizar uma limpeza, retirando pedaços de matéria orgânica mais visíveis. Após, é preciso secar a amostra coletada em campo, em estufa com temperatura de 60°C, conforme especificado em norma do DNER-ME 041/94. E só a partir disso é possível realizar o programa experimental idealizado.

3.2.2 Cimento

O cimento utilizado para o estudo foi o CP II E 32 RS. A Figura 24 elenca as características físico-químicas do cimento utilizado.

Figura 24 - Propriedades físico-químicas CP II E 32 RS.

PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS			
Estado físico	Sólido, na forma de pó muito fino, sem cheiro e cor cinza esverdeado		
pH em solução aquosa	$12 \leq \text{pH} \leq 14$	Ponto de fulgor (vaso fechado)	Não aplicável
Ponto de ebulição	Não aplicável	Massa específica aparente	$0,88 \leq \delta \leq 1,2$ g/cm ³ a 25°C
Ponto de fusão	Não aplicável	Solubilidade com indicação de solvente	Não aplicável
Massa específica absoluta	$2,8 \leq \delta \leq 3,2$ g/cm ³ a 25°C	Temperatura de auto-ignição	Não aceitável
Superfície específica	$\gamma \geq 400$ m ² /kg	Limite de explosividade, inferior/superior	Nenhum
Pressão de vapor em (mmHg)	Não aplicável	Coefficiente de partição octanol/água	Não aplicável
Solubilidade em água	1,6 g/L a 25°C	Taxa de evaporação	Não aplicável
Densidade do vapor	Não aplicável	Temperatura de decomposição	Não aplicável
Velocidade de evaporação (acetado de butila = 1)	Não aplicável	Resíduo em #325 mesh	Variável

Fonte: Mizu (2021).

3.2.3 Bagana de Carnaúba

O resíduo escolhido para a realização da estabilização de solo foi a bagana de carnaúba, proveniente da Agrocera Indústria Comércio e Exportação de Cera Vegetal LTDA, localizada em Sítio Borges, Zona Rural, S/N, Russas, Ceará, conforme apresentado na Figura 25. A empresa apresentou o processo produtivo realizado para a confecção da cera e todo o processo de estocagem e a divisão dos tipos de cera que são produzidas. Porém, o regimento interno não permite fotografar o processo produtivo e nem as instalações internas de estocagem e armazenagem.

Figura 25 - Vista aérea da Agrocera Indústria Comércio e Exportação de Cera Vegetal LTDA.



Fonte: Google Maps (2021).

A partir dos estudos realizados por Andrade (2018) foi possível obter algumas características físicas e químicas da bagana de carnaúba, a tabela 4 elenca estas características. Optou-se pelo uso da bagana de carnaúba pois seria uma destinação para um resíduo que é gerado em grande escala em Russas, já que a Agrocera LTDA exporta cera para grandes polos mundiais, além de ser um desafio, já que a bagana de carnaúba nunca foi utilizada na construção civil, apenas para fins agrícolas.

A bagana de carnaúba fornecida pela empresa Agrocera LTDA possui uma coloração escura, uma densidade global muito baixa e uma alta porosidade. A estocagem da bagana de carnaúba é controlada pela empresa, e antes de entrar no galpão de estocagem, ela passa por um processo de peneiramento, para só então ser levada para uma região aberta, na qual é transportada para os produtores agrícolas. Na Tabela 1 podemos encontrar algumas características físicas e químicas da bagana de carnaúba.

Tabela 1 - Características físicas e químicas da bagana de carnaúba.

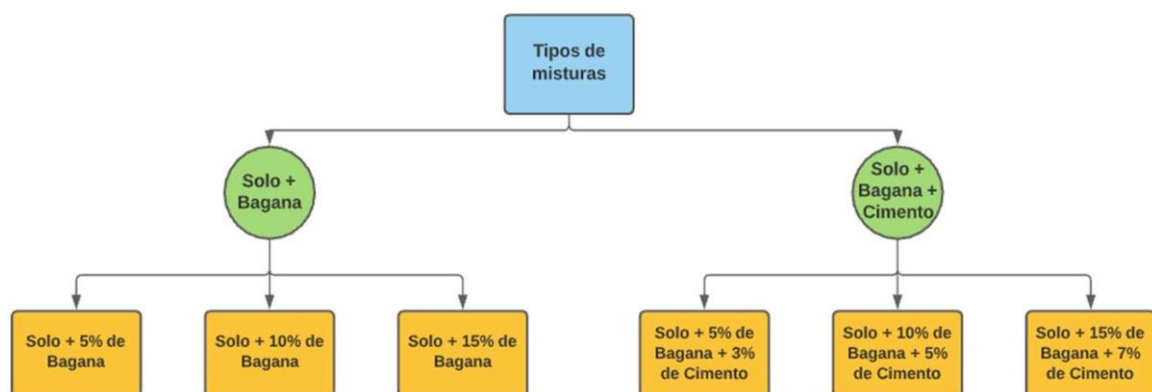
BAGANA DE CARNAÚBA		
Característica	Quantidade	Unidade
pH	5,3	-
Matéria Orgânica	598,86	g/kg
Nitrogênio	4,2	g/kg
Cálcio	19,80	cmol/kg
Magnésio	10,40	cmol/kg
Densidade Global	0,27	g/cm ³
Densidade de Partícula	0,90	g/cm ³
Porosidade	70,20	%

Fonte: Adaptado de Andrade (2018).

3.2.3 Mistura solo-resíduo

Como não foi possível utilizar nenhuma literatura para guiar a proporção de bagana com o solo, pois não existe nenhum estudo realizado com ela na pavimentação, optou-se por atribuir duas categorias de mistura, sendo elas: solo-bagana e solo-bagana-cimento. As proporções variam de mistura para mistura e a Figura 26 apresenta o fluxograma que elenca todas as misturas realizadas.

Figura 26 - Fluxograma de definição das misturas a serem estudadas.

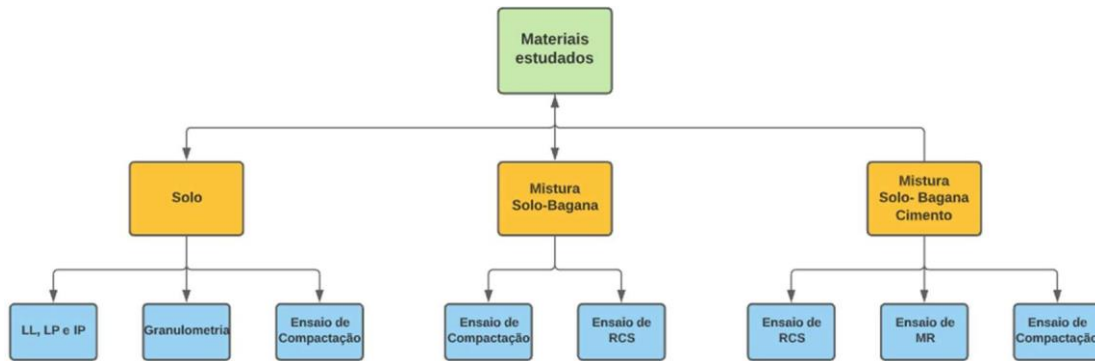


Fonte: Autor (2021).

3.3 Programa Experimental

Com base nos objetivos almejados nesta pesquisa, optou-se por um programa experimental que está representado na Figura 27. Cada etapa possui um programa experimental diferente, levando em consideração os ensaios mais importantes para caracterização de cada etapa.

Figura 27 - Fluxograma do programa experimental utilizado para a pesquisa.



Fonte: Autor (2021).

Como podemos ver na Figura 27, os ensaios de caracterização foram realizados para o solo, a mistura solo-bagana e a mistura solo-bagana com adição de cimento utilizados nesta pesquisa. Para a caracterização do solo foram realizados ensaios de Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade, granulometria por peneiramento e ensaio de compactação; os ensaios realizados para a mistura solo-bagana, foram os ensaios de compactação e Resistência à Compressão Simples (RCS); e por fim, para a mistura de solo-bagana com cimento, foram realizados os ensaios de RCS, Módulo de Resiliência (MR) e o ensaio de compactação.

3.3.1 Ensaios realizados no solo natural

3.3.1.2 Ensaios de Caracterização

Os ensaios de caracterização do solo seguiram todas as diretrizes do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) atual DNIT, e tem como objetivo determinar as propriedades físicas principais do solo. A Tabela 2 elenca todas as normas e métodos utilizados para a determinação das propriedades.

Tabela 2 - Normas empregadas para os ensaios realizados no solo.

Ensaio	Métodos
Limite de Liquidez (LL)	DNER-ME 122/94
Limite de Plasticidade (LP)	DNER-ME 082/94
Granulometria por peneiramento	DNER-ME 080/94
Ensaio de compactação	DNER-ME 162/94

Fonte: Autor (2021).

Por meio dos dados obtidos dos ensaios de LL e LP, pode-se encontrar o Índice de Plasticidade (IP). Segundo Ortigão (2007) o IP informa a amplitude da faixa de plasticidade, e com isso pode ser empregado para classificar solos. A Equação 1 corresponde ao cálculo do IP e as Figura 28 e 29 apresentam respectivamente os ensaios de LP e LL.

$$IP = LL - LP \quad (1)$$

Figura 28 - Primeiro ponto do ensaio de LP.



Fonte: Autor (2021).

Figura 29 - Materiais utilizados para o ensaio de LL.



Fonte: Autor (2021).

O ensaio de granulometria por peneiramento consiste na análise da distribuição das dimensões dos grãos a partir do peneiramento de uma amostra em uma série-padrão de peneiras. A partir das porcentagens acumuladas em cada peneira é possível caracterizar o solo fisicamente.

Com os resultados obtidos através dos ensaios citados acima, é possível utilizar o sistema de classificação de solos mais utilizado na engenharia rodoviária que é o da AASHTO. Como já citado anteriormente, na classificação AASHTO, os solos são divididos em grupos e subgrupos, em função da granulometria, limites de consistência e do índice de grupo. A Figura 2 elenca o quadro de classificação da AASHTO. O grupo do solo é determinado a partir de um processo de eliminação da esquerda para a direita, com base nos valores obtidos nos ensaios.

3.3.1.3 Ensaio de Compactação

O ensaio de compactação consiste na aplicação de uma força mecânica no material. Ao adicionar água ao solo durante o processo de compactação, a água exerce o papel de um agente amolecedor nas partículas de solo, que deslizam umas sobre as outras e compactam-se, aumentando sua densidade. O ensaio pode ser realizado em três energias distintas, sendo elas: normal, intermediária ou modificada, e o número de golpes varia para cada energia.

As misturas foram submetidas ao ensaio de compactação Proctor na energia normal (25 golpes). O solo é misturado com diferentes porcentagens de água, e depois, compactado em três camadas iguais em um molde com um volume de 944 cm³, por um soquete de 2,5 kg que golpeia 25 vezes cada camada.

Vale salientar que o processo é repetido quantas vezes forem necessárias para caracterizar a curva de compactação, sendo o mínimo de cinco vezes. Desmancha-se inteiramente o corpo de prova, após cada compactação retira-se uma amostra para determinação da umidade, e adiciona-se de 1 a 2 por cento de água para a execução do próximo ponto. A Figura 30 apresenta o primeiro corpo de prova do ensaio de compactação.

Figura 30 - Corpo de prova do ensaio de Compactação Proctor normal.



Fonte: Autor (2021).

3.3.2 Ensaio realizado no solo natural com bagana

Foram projetadas três diferentes misturas para o solo natural com a bagana de forma arbitrária, sendo elas: solo com adição de 5% de bagana, solo com adição de 10% de bagana e solo com adição de 15% de bagana. Para cada mistura idealizada foram realizados dois ensaios, o ensaio de compactação já citado anteriormente e o ensaio de resistência à compressão simples.

Os ensaios realizados nas misturas seguiram todas as diretrizes do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), atual DNIT. A Tabela 3 elenca todas as normas e métodos utilizados para a determinação das propriedades.

Tabela 3 - Normas empregadas para os ensaios realizados no solo com bagana.

Ensaio	Métodos
Ensaio de compactação	DNER-ME 162/94
Moldagem e cura de corpos de provas cilíndricos	DNER-ME 202/94
Ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCS)	DNER-ME 201/94

Fonte: Autor (2021).

Para a execução dos ensaios citados acima, é necessário efetuar a preparação das amostras. O solo recebido do campo é levado a estufa com temperatura de 105 ± 5 °C por 24 horas. Após a secagem em estufa, o solo é destorroado e limpo, retirando toda a matéria orgânica existente. Em seguida, passa o solo na peneira de 4,8 mm, até que se obtenha a quantidade de material necessária para cada ensaio.

Já no caso da bagana, leva-se apenas a bagana para a estufa com temperatura de 105 ± 5 °C por 24 horas e de acordo com a porcentagem pré-definida o solo com a bagana é uniformizado para que os ensaios possam ser realizados. A Figura 31 apresenta o solo com a adição de 5% de Bagana.

Figura 31 - Solo com 5% de Bagana.



Fonte: Autor (2021).

3.3.2.1 Ensaio de Compactação

O ensaio de compactação realizado na mistura consiste no mesmo processo já citado anteriormente no solo natural. O ensaio foi realizado para encontrar a umidade ótima dastrês misturas de solo-bagana. Foi utilizado o ensaio de compactação Proctor normal (25 golpes)e novamente, a cada ponto realizado, adicionava-se de 1% a 2% para homogeneização da amostra e encontrar o próximo ponto da curva de compactação.

3.3.2.2 Ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCS)

O ensaio de Resistência a Compressão Simples (RCS) foi realizado com base nas prescrições do DNER-ME 202/94, na mesma energia utilizada no ensaio de compactação, com corpos de prova moldados na umidade ótima. Após a moldagem, os corpos de provas foram levados a uma câmara úmida e mantido por 7 dias em um plástico filme que isola seu contato com o meio externo. Para cada mistura de solo-cimento, foram confeccionados três corpos de prova, um corpo de prova submetido a imersão 4 horas antes do rompimento, e outros dois corpos de provas sem imersão. A norma pré-estabelece uma velocidade da prensa, a 1 mm/min e ao final do ensaio é possível ter a Resistência à Compressão Simples da mistura. As Figuras 32 e a Figura 33 abaixo elencam algumas fases do processo realizado no ensaio.

Figura 32 - Corpos de prova em imersão para o ensaio.



Fonte: Autor (2021).

Figura 33 - Prensa utilizada para o ensaio.



Fonte: Autor (2021).

3.3.3 Ensaios realizados no solo natural com bagana e adição de cimento

No programa experimental definido, optou-se por diferentes misturas de solo-bagana com adição de cimento, em diferentes porcentagens, e buscou-se analisar o seu comportamento mecânico. Para cada mistura foram realizados dois ensaios, o ensaio de Resistência à Compressão Simples e o ensaio de Módulo de Resiliência. Para a realização dos ensaios, foram utilizadas as recomendações do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), atual Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), e a Tabela 4 elenca as normas e métodos que guiaram os ensaios.

Tabela 4 - Normas empregadas para os ensaios realizados no solo com bagana e cimento.

Ensaio	Métodos
Módulo de Resiliência	DNIT 134/2018 - ME
Ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCS)	DNER-ME 201/94
Moldagem e cura de corpos de provas cilíndricos	DNER-ME 202/94

Fonte: Autor (2021).

O ensaio de RCS seguiu o mesmo parâmetro utilizado para a mistura de solo-cimento, e a moldagem e cura dos corpos de prova também se guiaram pela DNER-ME 202/94. A umidade utilizada para o ensaio de RCS foi estimada com base nos resultados obtidos do ensaio de compactação do solo-bagana, com adição de 0,5% a 1% de água devido a adição do cimento ou de forma a compensar a perda de água por evaporação. Para o ensaio realizado optou-se pela utilização do cimento CP II E 32 RS e suas características já foram elencadas anteriormente.

3.3.3.1 Módulo de Resiliência

Para a realização do ensaio de módulo de resiliência foi utilizada a norma DNIT 134/2018-ME que utiliza o equipamento triaxial de cargas repetidas. Este ensaio possui uma alta importância para entendermos como o material se comporta quando submetidos a tensão e a sua capacidade de voltar ao seu estado natural, sendo esta característica é conhecida por resiliência.

Para a realização do ensaio triaxial de carga repetida o corpo de prova foi moldado na mesma umidade estimada no ensaio de RCS. O cilindro utilizado possui dimensões de 100 x 200 mm e é tripartido. O corpo de prova foi compactado em 10 camadas com a aplicação de 10 golpes por camada. O ensaio é dividido em duas etapas, sendo a primeira a etapa de condicionamento, que tem finalidade eliminar as deformações plásticas iniciais e o histórico de tensões e a segunda fase, é a fase de registro de deformações. Nessa última fase é mensurada a deformação específica resiliente correspondente à aplicação dos pares de tensões confinante e desvio.

Na primeira etapa, após a moldagem no cilindro tripartido, são aplicados três conjuntos de 500 golpes cada, em diferentes pares de tensões. Já na segunda fase são utilizadas diferentes tensões de confinamento (σ_3), que é a pressão de ar injetada na célula do

equipamento, e as tensões solicitantes (σ_d), totalizando 18 pares de tensões. A duração de aplicação da carga é de 0,1 segundos com 0,9 segundo de repouso, durante o período de repouso apenas as tensões de confinamento permanecem, sendo nula a tensão desvio (σ_d), que equivale à diferença das tensões σ_1 e σ_3 .

Os resultados obtidos do ensaio podem ser expressos por relações matemáticas através de modelos de comportamento elástico linear ou não linear, clássicos ou composto, entre o Módulo de Resiliência e a tensão desvio (σ_d) separadamente, a tensão de confinamento (σ_3) isoladamente ou ambas tensões, através de regressão.

De acordo com Figueiredo Filho e Silva Júnior (2009) o coeficiente de correlação (R^2) é uma medida da variância compartilhada entre duas variáveis. Varia de -1 a 1, e uma correlação perfeita indica que o escore de uma variável pode ser determinado exatamente ao se saber o escore da outra. No entanto, uma correlação de valor zero indica que não existe relação linear entre as variáveis. Vale ressaltar ainda que valores de R^2 que variam de 0,70 a 1 possuem forte correlação.

Desta forma, os modelos serão testados nos programas Excel e LABFit e o que apresentar melhor comportamento a partir da análise do R^2 , será utilizado para representar o comportamento resiliente do material. A tabela 5 elenca os modelos utilizados para descrever os comportamentos resilientes.

Tabela 5 - Modelos de comportamentos resilientes utilizados.

Modelo	Equação
Tensão desvio	$MR = Kl.\sigma_d^{k^2}$
Tensão confinante	$MR = Kl.\sigma_3^{k^2}$
Modelo Composto	$MR = Kl.\sigma_3^{k^2}.\sigma_d^{k^3}$

Fonte: Autor (2021).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados dos ensaios realizados no solo natural

4.1.1 Limites de Atterberg

Os ensaios de LP e LL foram realizados no solo seguindo os métodos e as normas já citadas na metodologia e os resultados obtidos foram de 10,90% e 16,30%, respectivamente. Com base na Equação 1 é possível encontrar o valor de IP, sendo igual a 5,40%, classificando assim o solo como um material pouco plástico. Os resultados obtidos para LL, LP e IP estão expressos na Tabela 6.

Tabela 6 - Valores dos limites de Atterberg.

Material	LL	LP	IP
Solo	16,30%	16,30%	5,40%

Fonte: Autor (2021).

Conforme os resultados obtidos é possível concluir que o solo utilizado pode ser aplicado em camadas de base e sub-base de pavimentos, tendo em vista que adequa nas especificações de consistência, sendo elas, LL máximo de 25% e IP máximo de 6%.

4.1.2 Análise granulométrica do solo

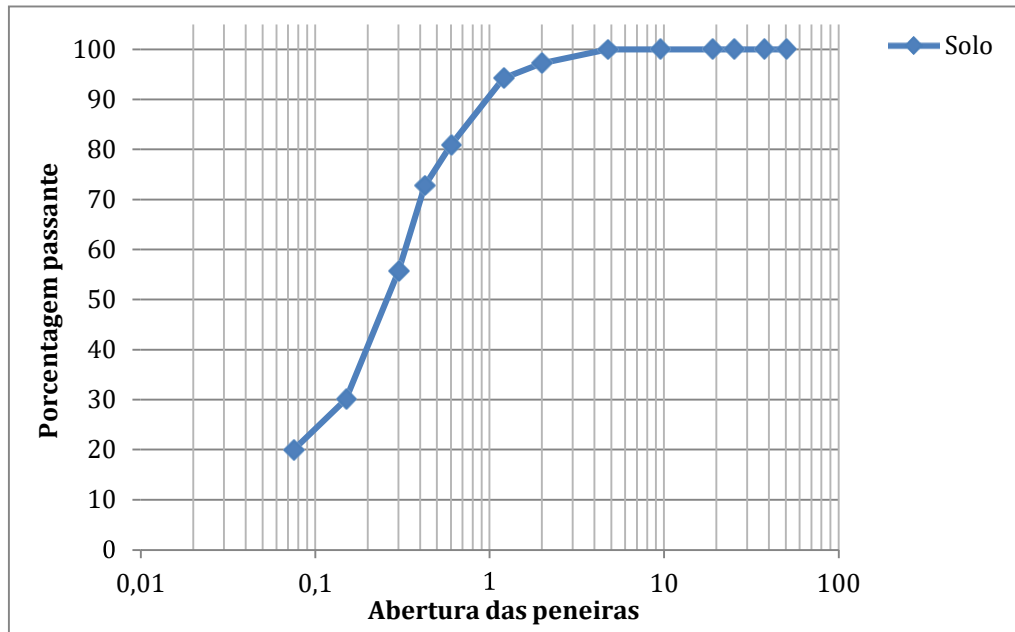
Para o ensaio de análise granulométrica por peneiramento foi possível obter a curva de granulometria do solo estudado. A Tabela 7 mostra os valores encontrados na granulometria da amostra ensaiada e o Gráfico 1 apresenta a curva de granulometria final do solo.

Tabela 7 - Análise granulométrica do solo.

Peneiras	50 mm	25 mm	9,5 mm	4,75 mm	2,0 mm	0,42 mm	0,15 mm	0,075 mm
% que passa	100%	100%	100%	100%	97,18%	74,67%	30,90%	20,50%

Fonte: Autor (2021).

Gráfico 1 - Curva granulométrica do solo estudado.



Fonte: Autor (2021).

Com base na Norma DNIT 141/2010 os materiais utilizados para as bases de pavimentos podem ser classificados em seis faixas granulométricas, que variam da Faixa A à Faixa F. A figura 34 elenca a tabela utilizada na norma para a classificação do material com base nas porcentagens passantes na série de peneiras.

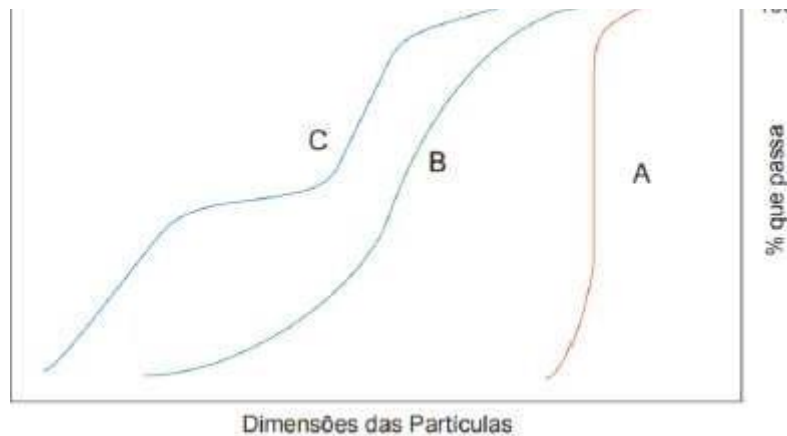
Figura 34 - Faixas granulométricas de materiais para base de pavimentos.

Peneira		% Passando, em Peso					
ASTM	mm	I	II	III	IV	V	VI
2"	50,8	100	100	-	-	-	-
1"	25,4	-	75-90	100	100	100	100
3/8"	9,5	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-
n° 4	4,8	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	70-100
n° 10	2,0	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100
n° 40	0,42	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70
n° 200	0,074	2-8	5-15	5-20	5-20	6-20	8-25
TRÁFEGO		LEVE/MÉDIO/PESADO				LEVE/MÉDIO	
NÚMERO "N"		-				$\leq 5 \times 10^6$	

Fonte: DNIT (2010).

O solo estudado se comparado aos valores presentes das faixas granulométricas definidas pelo DNIT, observa-se que ele não se enquadra em nenhuma faixa. Dessa forma, faz-se necessário uma outra alternativa de buscar classificar o solo. Como já discutido anteriormente, é possível classificar o solo de acordo com a sua uniformidade e graduação. Segundo o Manual de Pavimentação (DNIT, 2006) o solo pode ser identificado em uma das três curvas representadas na figura 35 abaixo.

Figura 35 - Tipos de granulometria.



Fonte: DNIT (2010).

A curva A apresenta solos uniformes em que os grãos indicam, aproximadamente, a mesma dimensão. A curva B apresenta os solos bem graduados, com partículas abrangem uma extensa faixa de valores. Por último, a curva C, possui solos mal graduados e se aplica a qualquer solo que não se encaixe nas duas curvas anteriores. Para a determinação da curva em que o material está encaixado, utiliza-se os coeficientes de uniformidade e de curvatura, apresentados, respectivamente, pelas Equações 3 e 4.

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (3)$$

$$Cc = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (4)$$

Onde:

Cu : Coeficiente de uniformidade;

Cc : Coeficiente de curvatura;

D_{10} : diâmetro das partículas do solo em relação a 10% do material que passa;

D_{30} : diâmetro das partículas do solo em relação a 30% do material que passa;

D_{60} : diâmetro das partículas do solo em relação a 60% do material que passa.

Portanto, com base nessas duas equações, o solo pode ser classificado de acordo com os seguintes limites a seguir:

$Cu < 5$: solo muito uniforme.

$5 < Cu < 15$: mediantemente uniforme.

$Cu > 15$: não uniforme.

$1 < Cc < 3$: solo bem graduado.

$Cc < 1$ ou $Cc > 3$: solo mal graduado.

Com base no que foi citado acima, os valores encontrados para Cu e Cc , 0 e 0. Isso acontece, pois, o solo estudado não apresentou nenhuma porcentagem passante de 10%. Portanto, o valor de D_{10} não existia, com isso, é possível concluir que o solo é muito uniforme, porém, mal graduado.

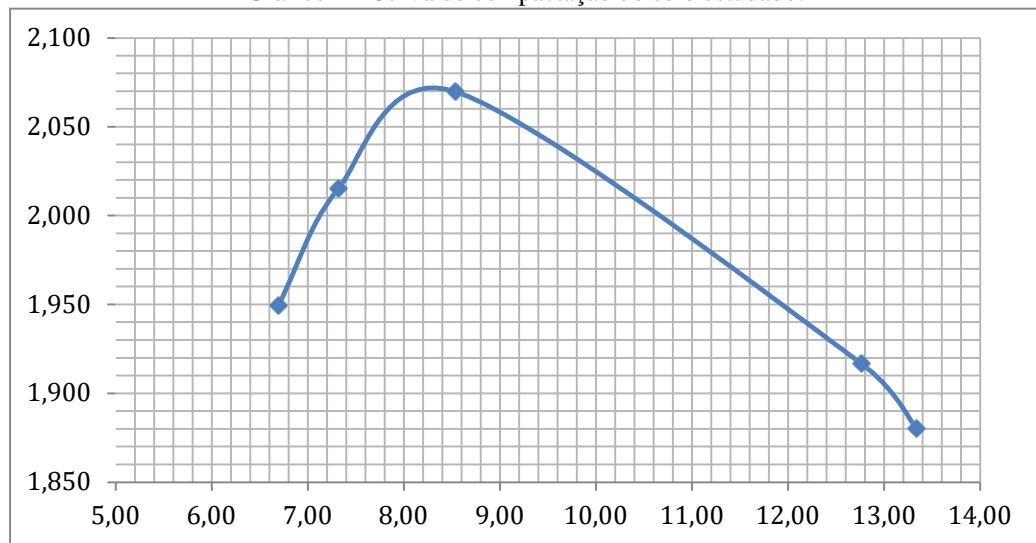
4.1.3 Classificação AASHTO

Para classificar o solo com base no Sistema Rodoviário de Classificação - AASHTO é necessário ter a granulometria e a plasticidade do solo, só com a posse desses dados é possível classificar com ábaco representado na Figura 2. De acordo com esse sistema, o solo utilizado neste trabalho foi caracterizado como sendo do grupo A-2-4. Segundo DNIT (2006), o subgrupo de solo A-2-4 abrange materiais como pedregulho e areia grossa, em que o valor máximo para o LL é 40% e o valor máximo para o IP é 10%. Além disso, solos classificados neste grupo geralmente possuem um comportamento para o subleito que varia de excelente a bom.

4.1.4 Curva de compactação

Foi realizado o ensaio de compactação no solo natural com base na norma do DNER-ME 162/94, com o objetivo de determinar o teor de umidade ótima do solo e a sua massa específica aparente seca máxima. O ensaio foi realizado com energia Proctor normal, com aplicação de 25 golpes em 3 camadas. Os valores obtidos foram de 2,07 g/cm³ de massa específica aparente seca máxima e 8,20% para a umidade ótima para o solo natural. O gráfico 2 mostra a curva de compactação do solo natural.

Gráfico 2 - Curva de compactação do solo estudado.



Fonte: Autor (2021).

4.1.5 Resistência à compressão simples

Com base nos ensaios de compactação é possível moldar e efetuar a cura dos corpos de prova de acordo com DNER-ME 202/94 e com base nas diretrizes DNER-ME 201/94 realiza-se o ensaio de RCS. Foram moldados quatro corpos de prova do solo, dois deles deveriam ser rompidos em imersão e os outros dois sem imersão. Todos os corpos de provas ficaram 7 dias de cura, até a realização do ensaio.

Os corpos de provas que ficaram em imersão não resistiram às 4 horas e portanto, não foram rompidos. Os outros dois corpos de prova foram rompidos a uma velocidade de 1 mm/min como a norma solicita e ambos obtiveram o valor de 0,15 MPa de resistência à compressão simples.

4.2 Análise do comportamento das misturas de solo-bagana

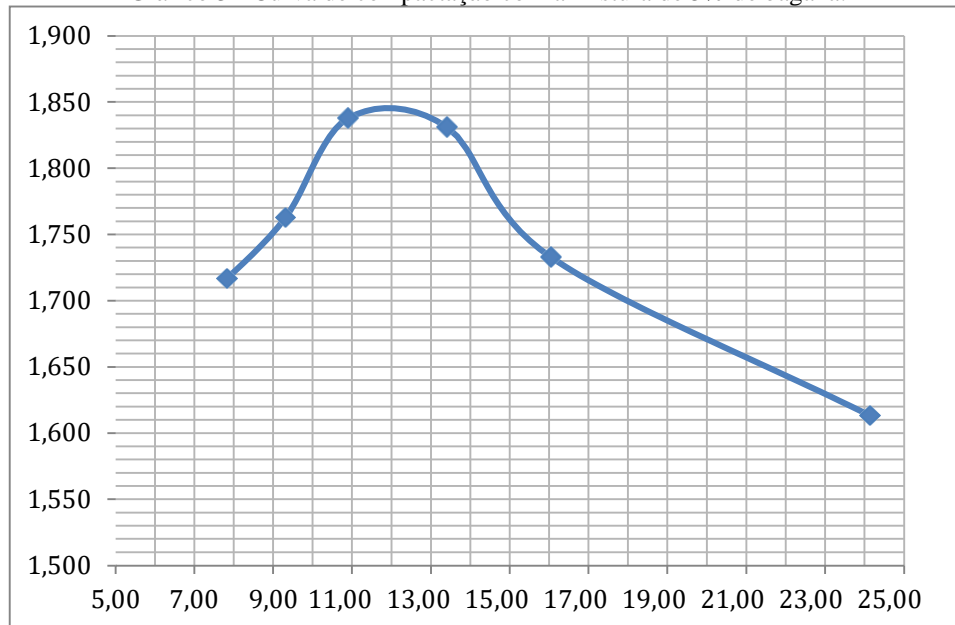
4.2.1 Curva de compactação

Foram realizados três ensaios de compactação das misturas de solo-bagana, como já citado no capítulo anterior. Os Gráficos 3, Gráficos 4 e Gráfico 5 apresentam as curvas de compactação obtidas para as misturas de solo + 5% de bagana, solo + 10 % de bagana e solo + 15% de bagana. Todos as três curvas foram ensaiadas com a energia normal, de 25 golpes por camada, sendo 3 camadas, que forneceram valores de 1,845 g/cm³, 1,62 g/cm³ e 1,72 g/cm³ para

massa específica aparente seca máxima e 11,9%, 17,16% e 21,60% para a umidade ótima para as misturas de 5%, 10% e 15% de solo bagana, respectivamente.

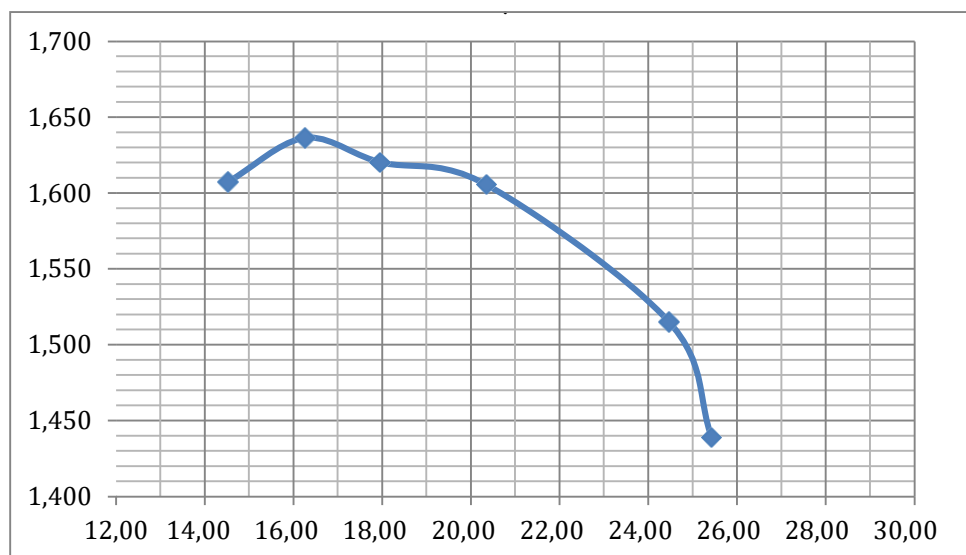
Pode-se inferir que a umidade ótima aumentou com o acréscimo da bagana. Isso acontece devido a sua alta porosidade da bagana que já foi citada no capítulo anterior. Outro fator que foi notado durante o ensaio de compactação é a dificuldade da moldagem do corpo de prova com o aumento da porcentagem de bagana, mesmo que a amostra apresentasse uma boa homogeneização.

Gráfico 3 - Curva de compactação com a mistura de 5% de bagana.



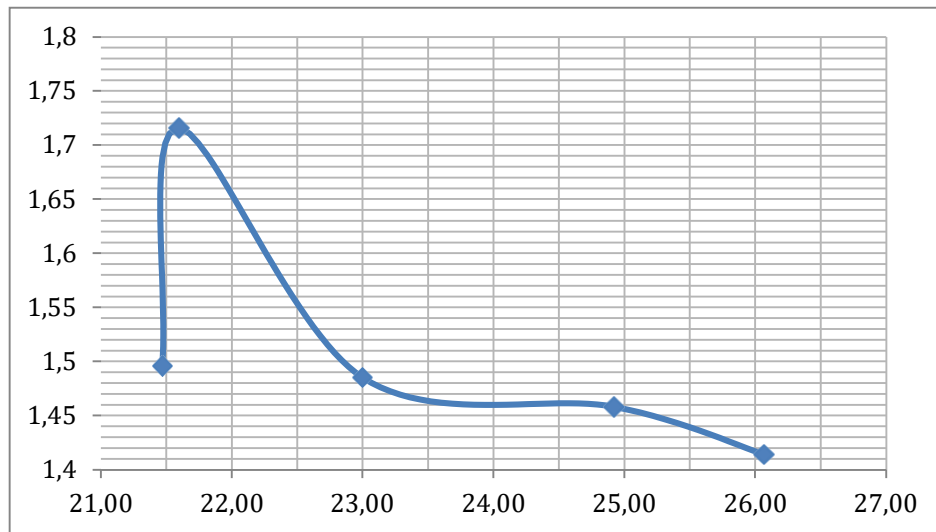
Fonte: Autor (2021).

Gráfico 4 - Curva de compactação com a mistura de 10% de bagana.



Fonte: Autor (2021).

Gráfico 5 - Curva de compactação com a mistura de 15% de bagana.



Fonte: Autor (2021).

4.2.2 Resistência à compressão simples

Com base nos ensaios de compactação é possível moldar e efetuar a cura dos corpos de prova de acordo com DNER-ME 202/94. Para cada mistura de solo-bagana foram moldados três corpos de prova, um corpo de prova era colocado em imersão 4 horas antes do rompimento e os outros dois eram rompidos sem imersão em água. Apenas a mistura de 15% resistiu a imersão, as outras dosagens os corpos de prova imersos não permaneceram intactos e não foram rompidos.

A partir da Tabela 8 é possível analisar todos os resultados obtidos para todas misturas de solo-bagana. Podemos perceber que não houve grandes ganhos de resistência com o acréscimo da bagana ao solo, e devido a isto foi idealizada a utilização de cimento nas amostras e analisar o comportamento com a adição e se haveria ganho de resistência significativo na amostra.

Tabela 8 - Resultados das 3 misturas para o ensaio de RCS.

Amostra	RCS (Mpa)
Solo + 5% - CP 1 (Imerso)	-
Solo + 5% - CP 2	0,13
Solo + 5% - CP 3	0,14
Solo + 10% - CP 1 (Imerso)	-
Solo + 10% - CP 2	0,13
Solo + 10% - CP 3	0,13

Solo + 15% - CP 1 (Imerso)	0,13
Solo + 15% - CP 2	0,14
Solo + 15% - CP 3	0,15

Fonte: Autor (2021).

4.3 Análise do comportamento das misturas de solo-bagana com adição de cimento

4.3.1 Resistência à compressão simples

Para o ensaio de resistência à compressão simples, foram utilizadas as diretrizes da DNER-ME 201/94 para todas as quatro misturas utilizadas. Para a moldagem dos corpos de prova foram utilizadas as unidades ótimas obtidas no ensaio de compactação do solo-bagana, adicionando apenas de 0,5% a 1% de água devido a adição do cimento e também para compensar a perda de água por evaporação.

A princípio foram idealizadas três misturas, sendo elas: solo + 5% de bagana + 3% de cimento (mistura 1), solo + 10% de bagana + 5% de cimento (mistura 2) e solo + 15% de bagana + 7% de cimento (mistura 3). As misturas foram denominadas de mistura 1, 2 e 3. Para todas as misturas apresentadas, foram confeccionados três corpos de prova, um corpo de prova para o rompimento com imersão e dois para o rompimento sem imersão. Todos os corpos de prova que foram submetidos à imersão, resistiram às 4 horas que o ensaio solicitava antes do rompimento. A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos com o ensaio de RCS.

Tabela 9 - Resultado do ensaio de RCS com adição de cimento.

Amostra	RCS (Mpa)
Mistura 1 - Imerso	0,28
Mistura 1 - CP 2	0,31
Mistura 1 - CP 3	0,32
Mistura 2 - Imerso	0,29
Mistura 2 - CP 2	0,31
Mistura 2 - CP 3	0,34
Mistura 3 - Imerso	0,25
Mistura 3 - CP 2	0,34
Mistura 3 - CP 3	0,37

Fonte: Autor (2021).

Com os resultados apresentados na Tabela 9 pode-se perceber que houve um ganho significativo na resistência em todas as misturas ensaiadas, porém, com os resultados obtidos é inviável a utilização dessas misturas nas camadas dos pavimentos rodoviários. Pensando nisso foi idealizada uma nova dosagem, sendo uma mistura composta por solo + 5% de bagana + 10% de cimento (mistura 4).

Na Tabela 9 foi possível notar também que não houve grande diferença de resultados para as diferentes porcentagens de cimento e bagana, com base nisso, a mistura de solo-bagana escolhida foi a de solo + 5% de bagana, tendo em vista que a moldagem e o consumo de água com essa dosagem são melhores, devido à baixa porcentagem de bagana. O consumo de cimento para essa mistura foi maior, pois, a redução do índice de vazios ocorre quando há o aumento do teor de cimento e o contato entre as partículas da mistura aumenta, elevando assim a resistência à compressão simples (CONSOLI et al., 2012).

O ensaio novamente seguiu as diretrizes já citadas anteriormente e para essa nova mistura foram produzidos mais três corpos de prova, um submetido à imersão antes do rompimento e dois sem imersão. Os resultados obtidos no ensaio estão representados na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultado do ensaio de RCS com adição de cimento para a mistura 4.

Amostra	RCS (Mpa)
Mistura 4 - Imerso	0,94
Mistura 4 - CP 2	1,08
Mistura 4 - CP 3	1,135

Fonte: Autor (2021).

A nova dosagem teve um ganho significativo na resistência à compressão simples. Esses resultados indicam que essa dosagem permite o uso da mistura nas camadas de sub-base de pavimentos rodoviários. Vale ressaltar a importância ambiental existente, pois apesar da adição de cimento tornar a obra mais onerosa, é necessário buscar maneiras de reduzir os impactos gerados à natureza e encontrar materiais alternativos para a estabilização dos solos.

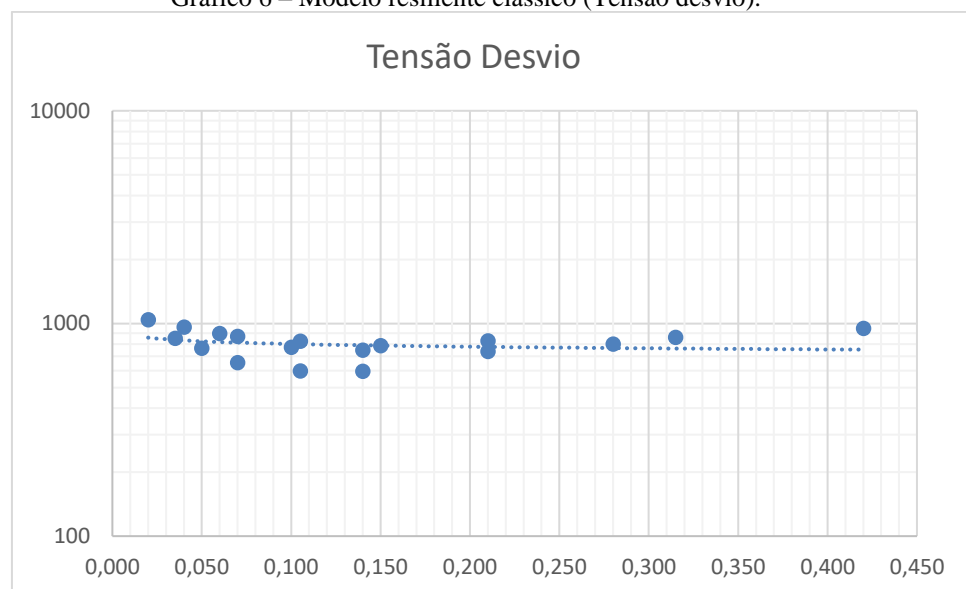
4.3.2 Módulo de Resiliência

O ensaio de Módulo de Resiliência (MR) foi realizado para a mistura 4, tendo em vista que possuiu o melhor desempenho mecânico dentre as quatro misturas. O ensaio foi realizado a partir da moldagem do corpo de prova na umidade ótima da mistura.

Os programas Excel e LABFit foram utilizados para a análise dos resultados obtidos no ensaio de MR. O LABFit é um *software* utilizado para tratamento e análise de dados experimentais e ajustes de curvas.

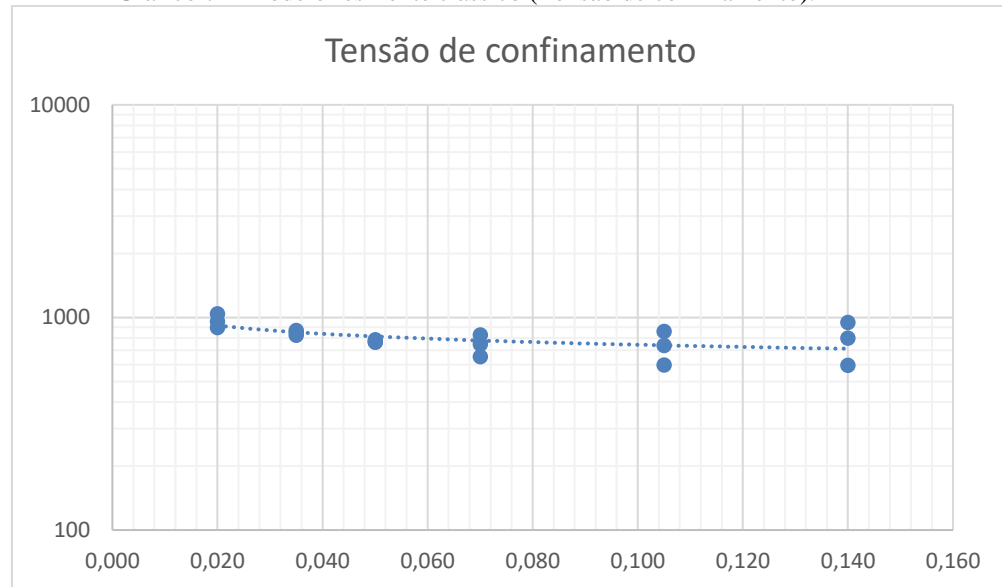
Para avaliar o desempenho resiliente da mistura, é necessário analisar os resultados obtidos no ensaio e testar qual o modelo resiliente que melhor representa o comportamento resiliente da mistura proposta. Nesta pesquisa optou-se por utilizar apenas os modelos clássicos que descrevem os comportamentos resilientes de solos e o modelo composto, o qual é representado por uma superfície. Como já dito anteriormente, esses modelos relacionam o MR com a tensão desvio (σ_d) e a tensão confinante (σ_3) e com as duas tensões simultaneamente. Os Gráficos 6 e 7, apresentam o comportamento das tensões desvio e confinamento, respectivamente.

Gráfico 6 – Modelo resiliente clássico (Tensão desvio).



Fonte: Autor (2021).

Gráfico 7 – Modelo resiliente clássico (Tensão de confinamento).



Fonte: Autor (2021).

A Tabela 11 elenca os valores dos parâmetros de modelagem (K) e os coeficientes de correlação (R^2). É possível observar que os valores de R^2 do modelo composto são superiores se comparados aos modelos clássicos, porém mesmo assim ele ainda não foi satisfatório. Acredita-se que o comportamento que melhor representa a mistura é o modelo linear, tendo em vista que misturas de solo-cimento tendem a ter um comportamento que se enquadra melhor nesse modelo.

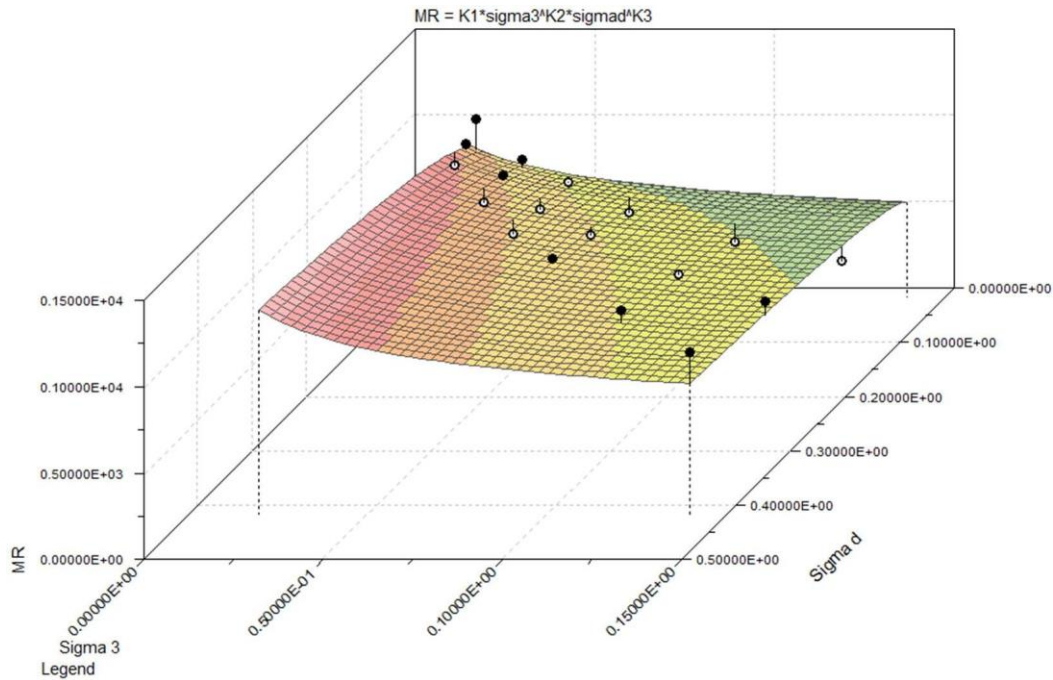
Tabela 11 - Valores dos parâmetros para os diferentes modelos resilientes.

Mistura	$MR = K1 \cdot \sigma d^{K2}$			$MR = K1 \cdot \sigma 3^{K2}$			$MR = K1 \cdot \sigma 3^{K2} \cdot \sigma d^{K3}$			
	K1	K2	R ²	K1	K2	R ²	K1	K2	K3	R ²
4	725,85	-0,043	0,054	551,92	-0,13	0,334	528,74	-0,23	0,104	0,47

Fonte: Autor (2021)

A figura 36 apresenta a superfície que representa o comportamento da mistura 4 para o modelo composto testado, obtidos através do *software* LABFit, é possível observar que a mistura varia em maior dependência com a tensão desvio. Vale ressaltar que o valor médio do módulo de resiliência obtido foi de 807 MPa.

Figura 36 - Curva de MR para o modelo composto.



Fonte: Autor (2021).

4.4 Dimensionamento do pavimento

Como forma de avaliar o desempenho da mistura em pavimentos flexíveis, optou-se pelo dimensionamento pelo meio do método mecanístico-empírico, baseado na pesquisa “*Método de Dimensionamento Mecanístico-empírico de Pavimentos Asfálticos – SISPAV*”, utilizando os dados obtidos através do ensaio de MR no *software* SisPavBR.

Para o dimensionamento da estrutura é necessário levar em consideração que os materiais utilizados devem possuir uma similaridade com a região na qual se baseia o estudo, com isso, adotou-se a seguinte estrutura: revestimento de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 50/70 com MR constante de 4193 MPa, base de material granular com parâmetros k_1 e k_2 fornecidos pelo banco de dados do *software* SISPAV e subleito de solos finos, siltosos ou argilosos com MR constante de 130 MPa. Para a camada de sub-base utilizou-se a mistura 4, o modelo utilizado para o MR foi o método linear, adotando o MR médio da mistura de 807 MPa, tendo em vista que os valores de R^2 não apresentaram valores significativos para o grau de confiabilidade do dimensionamento.

Ainda sobre o dimensionamento, foram idealizados quatro casos de estruturas, três que levam em consideração o volume de tráfego, sendo elas: leve, médio e pesado. E a última,

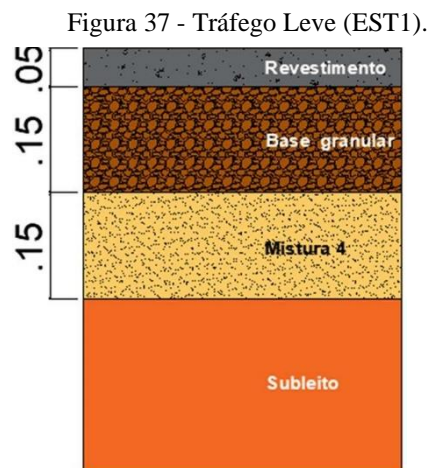
que propõe uma redução no volume de revestimento para o tráfego pesado, como forma de reduzir o custo final do pavimento. A Tabela 12 elenca os números equivalentes N de repetições do eixo simples de roda dupla utilizado para cada tráfego. Todos os projetos foram idealizados para um horizonte de projeto de 10 anos.

Tabela 12 - Tipos de tráfego.

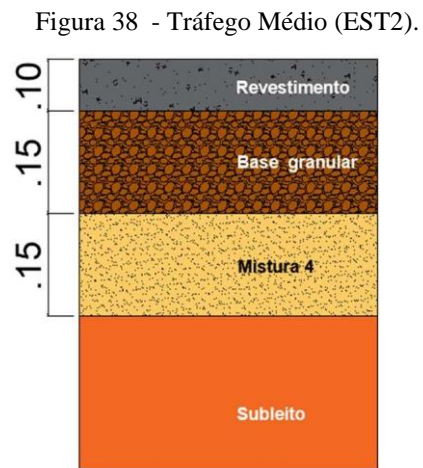
Tipo de tráfego	N
Leve	8×10^5
Médio	5×10^6
Pesado	1×10^7

Fonte: Autor (2021).

Foram obtidas quatro estruturas com dimensões totais de 35cm, 40 cm, 45 cm e 47 cm, respectivamente. Para a estrutura 1 (EST1), apresentada na Figura 37, adotou-se um revestimento mínimo de 5 cm, base granular de 15 cm e sub-base de 15 cm. A estrutura 2 (EST2), representada na Figura 38, possui revestimento de 10 cm, base granular de 15 cm e sub-base de 15cm. Já para a estrutura 3 (EST3), apresentada na Figura 39, revestimento de 15 cm, base granular de 15 cm e sub-base de 15 cm. E por fim, a estrutura 4 (EST4), representada na Figura 40, o revestimento possui 14 cm, a base granular de 15 cm e sub-base de 18 cm.

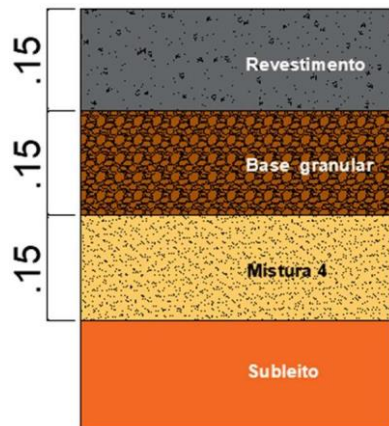


Fonte: Autor (2021).



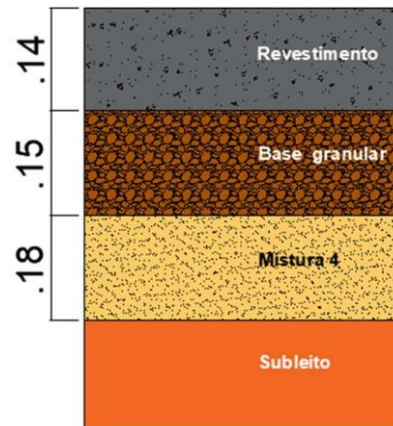
Fonte: Autor (2021).

Figura 39 - Tráfego Pesado (EST3).



Fonte: Autor (2021).

Figura 40 - Tráfego Pesado com redução (EST4).



Fonte: Autor (2021).

A EST1 atingiu as espessuras mínimas especificadas pelo DNIT e vida de projeto de aproximadamente 42 anos, desempenho bastante satisfatório e mostrando-se uma ótima opção para vias tráfegos leves. A EST2 nas camadas de base e sub-base manteve-se nas espessuras mínimas definidas pelo DNIT, porém, houve um acréscimo de 5cm na camada de revestimento e a vida útil de projeto para essa estrutura foi de 10 anos.

A EST3 manteve as espessuras mínimas na base e sub-base, porém, houve um acréscimo de 5 cm no revestimento se comparada a EST2, mas, a vida útil de projeto foi de 10 anos. E por fim, a EST4 que foi idealizada para buscar uma redução na camada de revestimento, e houve uma diminuição de 1 cm na camada de revestimento, se comparada a EST3. Isso ocorreu graças aumento de 3 cm na camada da sub-base, proveniente da mistura 4 idealizada na pesquisa. Sua vida útil de projeto manteve-se em 10 anos.

Vale salientar que para o dimensionamento dessas estruturas pelo SisPavBR, primeiramente foi utilizado o comando de “dimensionar”, a partir dos resultados obtidos era possível avaliar no comando “vida de projeto” qual o horizonte de projeto da estrutura e se estaria de acordo com as diretrizes estabelecidas pelo DNIT.

4.5 Análise Financeira

Como forma de avaliar o impacto gerado pela diminuição na camada de revestimento da EST4 em comparação com a EST3, foi realizada uma análise financeira do impacto gerado pela redução da espessura na camada de revestimento, devido ao aumento da camada de sub-base e se isso gera um menor custo à construção do pavimento.

Para a análise financeira realizada, utilizou-se as tabelas de custos da Secretaria de Infraestrutura do Estado do Ceará (SEINFRA-CE) do ano de 2020 com vigência atual e SEINFRA/ANP (Agência Nacional do Petróleo) versão 2021/03 a respeito dos insumos do Grupo Material Betuminoso. Para essa análise ponderou-se o solo com custo zero para transporte e aquisição. Para o cálculo do custo da sub-base como não há um serviço de solo cimento, utilizou-se o serviço C3968 que é solo cal (5%), porém foi alterado o material apenas para o cimento e sua porcentagem, que para este caso é 10%.

Com isso, adotou-se um trecho de 1 km de comprimento e 7,2 m de largura para as camadas de revestimento (R) e de sub-base (SB). Tanto para a EST3 quanto para a EST4, calculou-se os custos da construção das camadas de revestimento e sub-base, tendo em vista que a camada de base se manteve constante. Na Tabela 13 e Tabela 14 estão os custos obtidos para a construção das camadas de ambas estruturas.

Tabela 13 - Custo para construção das camadas da EST3.

Descrição	Unidade	Custo		Total
		Unitário (R\$)	Quantidade	
Execução de camada R -				
Composição C3155 – Concreto				
Betuminoso Usinado a Quente com CAP 50/70)	m ³	587,31	1080	R\$ 634.294,80
Execução da Camada de SB -				
Composição C3968 – Base Solo Cimento (10%)				
			Custo Total	R\$ 761.810,40

Fonte: Autor (2021).

Tabela 14- Custo para a construção das camadas da EST4.

Descrição	Unidade	Custo Unitário (R\$)	Quantidade	Total
Execução de camada R - Composição C3155 – Concreto Betuminoso Usinado a Quente com CAP 50/70)	m ³	587,31	1008	R\$ 592.008,48
Execução da Camada de SB - Composição C3968 – Base Solo Cimento (10%)	m ³	118,07	1296	R\$ 153.018,72
			Custo Total	R\$ 745.027,20

Fonte: Autor (2021).

Com base nos resultados obtidos é possível perceber que o aumento da espessura na camada de sub-base, camada essa que é composta pela mistura idealizada pela pesquisa, reduziu a espessura da camada de revestimento. Aliado a isso se obteve um menor custo no final do pavimento. Pois, para a via de tráfego pesado projetada, a EST4 promove uma economia de aproximadamente 17 mil reais para cada quilômetro construído.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O foco desta pesquisa foi analisar o uso da bagana de carnaúba produzida no Vale do Jaguaribe para as camadas de pavimento rodoviários, por meio da estabilização de solos, a partir de ensaios mecânicos. Para esse fim, foram idealizadas algumas dosagens de bagana com o solo local, com e sem adição de cimento.

Para a caracterização do solo e para análise do comportamento mecânico deste e das misturas estudadas, foram realizados os ensaios de Módulo de Resiliência e Resistência à Compressão Simples. A partir dos resultados obtidos, foi possível realizar o dimensionamento do pavimento por meio do método mecanístico-empírico no programa SisPavBR. As conclusões obtidas são expostas abaixo:

- O solo possuía uma resistência muito baixa se comparada às especificações para a utilização em pavimentos rodoviários, e quando o resíduo foi adicionado em proporções distintas, não houve ganhos significativos na resistência do solo. Devido a isso, o cimento foi adicionado para potencializar a resistência das misturas.
- Foram realizadas três misturas de solo-bagana com adição de cimento, houve um aumento na resistência final do solo, porém não foi possível atingir uma resistência superior a 1MPa, como é definido por norma, para o uso em sub-base de rodovias. Portanto, uma quarta mistura foi idealizada, sendo ela solo-bagana (5%) com adição de 10% de cimento. Essa mistura obteve um ótimo comportamento mecânico.
- A partir dessa mistura, foi realizado o ensaio de Módulo de Resiliência, pois com os resultados obtidos do ensaio, era possível dimensionar o pavimento para três situações de tráfegos diferentes: leve, médio e pesado. O dimensionamento dos pavimentos foi realizado através do método mecanístico-empírico.
- A mistura mostrou-se eficaz para os diferentes tipos de tráfegos, e para uma situação tráfego pesado, o aumento da camada de sub-base, possibilitou uma redução na espessura do revestimento que resulta em um menor custo, além da importância de dar uma destinação aos resíduos gerados pela indústria de cera de carnaúba.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Como forma de complementar o estudo realizado, seguem algumas sugestões e recomendações para a elaboração de trabalhos futuros referentes ao uso da bagana de carnaúba na pavimentação.

- Realizar os ensaios de deformação permanente para que seja possível complementar a análise do comportamento mecânico da mistura, e utilizar o *software* MeDiNa para o dimensionamento do pavimento;
- Estudar outras proporções de mistura solo-bagana a fim de obter uma melhor composição quanto ao desempenho mecânico;
- Utilizar outros tipos de solos, com as mesmas proporções de bagana, para avaliar o desempenho em camadas de sub-basae de pavimentos rodoviários através de estudos comparativos;
- Realizar novas dosagens de solo-bagana, porém, com a adição de cal e avaliar quais as novas características mecânicas que se apresentam;
- Realizar um estudo sobre a composição química da bagana de Carnaúba e mineralogia do solo.

REFERÊNCIAS

- ALCÂNTARA, Marco Antonio de Moraes et al. **Efeito da cinza de casca de arroz na plasticidade e compactação de uma mistura solo-cal.** *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 22, n. 3, 2017.
- ANDRADE, Hosana Aguiar Freitas de. **Bagana de carnaúba como substrato na produção de mudas de mamoeiro cultivar 'golden' sob substâncias húmicas.** 2018.
- ARAÚJO, Sergiano de Lima. **O gosto amargo das frutas nas terras do senhor: a territorialização da produção capitalista e as disputas territoriais entre o agronegócio e o campesinato na região do Baixo Jaguaribe (CE).** 2016.
- BARROS, Kelvia Silva. **Estudo de cinzas volantes de uma termelétrica da região metropolitana de Fortaleza - CE para aplicação em camadas granulares de pavimentos.** 2015.
- BEHAK, Leonardo. **Estabilização de um solo sedimentar arenoso do Uruguai com cinza de casca de arroz e cal.** 2007. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre/RS, 171p.
- BONFANTE, Marcelo. **Estabilização de um solo arenoso com cinza da casca de arroz e cal para utilização em camadas de pavimento.** 2016.
- CASTELO BRANCO, Verônica Teixeira Franco. **Caracterização de misturas asfálticas com o uso de escória de aciaria como agregado.** Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro, Brasil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.
- CATTON, M. D. (1962). **Soil-Cement Technology - A Résumé.** Research and Development Laboratories of the Portland Cement Association; Bulletin 136. Reprinted from the Journal of PCA Research and Development Laboratories, v. 4, n.1, p. 13-21.
- CHAVES, Maria Lucenir Jerônimo; DE LIMA ARAÚJO, Sergiano. **Modernização socioespacial e urbanização na região Baixo Jaguaribe–Ceará.** *Revista da Casa da Geografia de Sobral*, v. 11, n. 1, p. 4, 2009.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento de safra brasileira cana-de-açúcar, terceiro levantamento, julho/2019.** Companhia Nacional de Abastecimento. Brasília: CONAB, 2019.
- CONCHA, L.M.C. **Estudo da fadiga de duas misturas de solo-cimento.** Rio de Janeiro: UFRJ, 1986. (Dissertação de Mestrado).

CONSOLI, Nilo; Amanda, J. e Bravo, M. **Avaliação da resistência mecânica de um solo siltoso estabilizado com cal submetido ao ensaio de compressão simples (2012)**. Porto Alegre, RS.

CORDEIRO, G. C. et al. **Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars**. Cement and Concrete composites, v. 30, n. 5, p. 410-418, 2008.

COUTINHO, A de Sousa. **Fabrico e Propriedades do Betão**. Lisboa: Lneq, 1973. 610 p

CRISTELO, N. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal**. 2001. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Estruturas, Geotecnia e Fundações, Universidade do Minho, Guimarães, 2001.

DA CARNAÚBA, Câmara Setorial. **A carnaúba: preservação e sustentabilidade. Câmara setorial da carnaúba**. Fortaleza: Câmara Setorial de Carnaúba, 2009.

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. 6. ed. São Paulo: Thomson, 2007. 559 p. Tradução da 6ª edição norte-americana.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-EM 035**: Peneiras de Malhas Quadradas para Análise Granulométrica de Solos. DNER, 1995. 6 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 041**: Solos – Preparação de Amostras para Ensaios de Caracterização. DNER, 1994. 6 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 080**: Solos – Análise Granulométrica por Peneiramento. DNER, 1994. 4 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 082**: Solos – Determinação do Limite de Plasticidade. DNER, 1994. 3 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 122**: Solos – Determinação do Limite de Liquidez – Método de Referência e Método Expedido. DNER, 1994. 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 162**: Solos – Ensaio de Compactação Utilizando Amostras Trabalhadas. DNER, 1994. 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 201**: Solos – Ensaio de compressão axial de corpos de prova cilíndricos. DNER, 1994. 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 202**: Solos – Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos. DNER, 1994. 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 134 – ME**: Pavimentação – Solos – Determinação do Módulo de Resiliência. DNIT, 2018. 18 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Pavimentação – Base

estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço. **Norma DNIT 141** – ES. Rio de Janeiro, RJ, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 179** – IE: Pavimentação – Solos – Determinação da Deformação Permanente. DNIT, 2018. 20 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR, 2006.

DIAS, J. J.F.M.S (2012). **Tratamento de solos com cimento para obtenção de melhores características mecânicas**. Dissertação de mestrado em engenharia civil, Universidade nova de Lisboa, Lisboa, Portugal, 97 p.

DUQUE, J. G. **Solo e água no polígono das secas**. 6 ed. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, 2004.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional**. Rio de Janeiro: EPE, 2019. 67 p. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2019>>. Acesso em: 28 jul. 2020.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Tipos de cinzas e composição**. Disponível em: <<https://www.fhwa.dot.gov>> Acesso em: Julho/2020.

FEITOSA, Johnny Peter Macedo. **Avaliação do uso de diferentes tipos de cera de carnaúba como aditivo para misturas mornas**. 2015.

FERNANDES, Daniel Pinto. **Estudo de estabilização química, geo-mecânica e ambiental das escórias de aciaria LD para fins de aplicação como material de lastro ferroviário em vias sinalizadas**. 2010.

FIGUEIREDO FILHO, Dalson Britto; SILVA JUNIOR, José Alexandre. **Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r)**. Revista Política Hoje, v. 18, n. 1, p. 115-146, 2009.

FREITAS, Jogério Evangelista de. **Uso de cinza da casca de arroz na estabilização de solos para uso em pavimento rodoviário**. 2018.

GIRÃO, Adalberto R.; DUTRA, Indalécio; SOUZA, Francisco de. **Área irrigada e métodos de irrigação no Estado do Ceará, segundo o Censo Agropecuário de 1995-1996**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 5, n. 1, p. 161-165, 2001.

GONDIM, Lilian Medeiros. **Estudo experimental de misturas solo-emulsão aplicado às rodovias do agropólo do Baixo Jaguaribe-Estado do Ceará**. 2008.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal: Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil**. 2. ed. São Paulo: PINI, 2002. 341 p.

IBS - Instituto Brasileiro de Siderurgia. **Escórias Siderúrgicas – Novas Tendências, 9ª Reunião de Pavimentação Urbana.** 1998.

JACINTHO, Elza Conrado. **Estudo do comportamento de misturas solo-emulsão para uso em barragens.** 2005. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 160p.

KÉZDI, Á. **Stabilized earth roads: developments in geotechnical engineering.** Amsterdam: Elsevier, 1979.

KIHARA, Yushiro. **O estudo mineralógico das cinzas volantes brasileiras: origem, características e qualidade.** 1983. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

LEON, Helena Batista. **Estabilização de solos lateríticos: uma alternativa para os resíduos de cinza da casca de arroz.** 2015.

LIMA, Thayssa Vieira de. **Estudo comparativo entre o comportamento mecânico de misturas solo-brita com calcário e granito para uso em pavimentação.** 2019.

LIMA, Adriana Ribeiro de. **Trabalhadores da carnaúba: paisagem cultural e modos de vida dos camponeses em Russas-Ce na primeira metade do século XX.** 2007

MACHADO, Alexandre T. **Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria.** 2000. 135 f. 2000. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **PAVIMENTOS ECONÔMICOS: Tecnologia do uso dos Solos Finos Lateríticos.** São Paulo: Arte & Ciência, 2009. 291 p.

NÚÑEZ, W. P. **Estabilização Físico-química de um Solo Residual de Arenito Botucatu, Visando seu Emprego na Pavimentação.** 1991. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

OLIVEIRA, Victor Cardoso et al. **Avaliação de cinzas de carvão mineral e cera de carnaúba como aditivos em ligantes asfálticos e a incorporação da cinza como fíler mineral em misturas asfálticas.** 2018.

OLIVEIRA, Bianca Stephanie et al. **Avaliação do potencial do reaproveitamento da escória de aciaria Id como agregado siderúrgico.** Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, v. 7, n. 2, p. 206-229, 2018.

ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução à Mecânica dos Solos dos Estados Críticos.** 3. ed. Rio de Janeiro: Terratek, 2007. 385 p

PACHECO, Lysiane Menezes. **Solos estabilizados com emulsão asfáltica para uso em pavimentação: estudo laboratorial.** 2011.

PAULA, Marcos O. de et al. **Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 13, n. 3, p. 353-357, 2009.

PEIXOTO, R. A. F.; NUNES, F. P.; AFFONSO, H. M. M. **Estudo da influência do teor de cimento na resistência mecânica de misturas em solo-cimento aditivado.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30. 2001, Foz do Iguaçu. Anais... Foz do Iguaçu: Conbea, 2001.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos.** 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 354 p.

QUISPE, Isabel; NAVIA, Rodrigo; KAHHAT, Ramzy. **Energy potential from rice husk through direct combustion and fast pyrolysis: a review.** Waste management, v. 59, p. 200-210, 2017.

ROHDE, Geraldo Mario; ZWONOK, Oleg. **Cinzas de carvão fóssil no Brasil: aspectos técnicos e ambientais.** Cientec, 2006.

SANTOS, Washington José et al. **Avaliação do uso de emulsão asfáltica na estabilização química de três solos de Sergipe.** 2009.

SANTOS, J. **Estabilização de uma argila laterítica do distrito federal para uso em rodovias de baixo volume de tráfego.** 2004. 95 f. Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

SEDET. **Secretaria do Desenvolvimento Econômico e Trabalho.** Disponível em: <<https://www.sedet.ce.gov.br/2017/08/24/fdiemprego/>> Acesso em: Maio/2020

SENÇO, W. de. **Manual de Técnicas de Pavimentação, volume 1.** 2. ed. ampl. São Paulo: Pini, 2007.

SENÇO, W. de. **Manual de Técnicas de Pavimentação, volume 2.** 1. ed. São Paulo: Pini, 2001.

SILVA, Ana Carolina Amaral; MORAES, Talles Jaruzo; MACHADO, Lucas Ferreira Melo. **Proposta para adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar como material pozolânico em pavimentações.** Interfaces Científicas-Exatas e Tecnológicas, v. 4, n. 1, p. 21-30, 2020.

SILVA, OH da et al. **Potencial energético da biomassa da casca de arroz no Brasil.** Simpósio III Ambiental, 2012.

SOUTO, IHS. **Avaliação do desempenho da cinza do bagaço de cana-de-açúcar na produção de concretos.** 2010, 105f. 2010. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Maringá, UEM, Centro de Tecnologia, Maringá.

SOUSA, R. L. O. de. **Caracterização Geotécnica dos Solos do Baixo Jaguaribe para Uso em Pavimentação.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Russas, 2019.

SOUZA, Cimone Rozendo de et al. **Instituições prevaletentes, tradição e persistência no extrativismo da cera de carnaúba em Limoeiro do Norte-CE.** 2011. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

TAVARES, Diogo Santos; ODA, Sandra; MOTTA, LMG. **Utilização do agregado siderúrgico (escória de aciaria) em pavimentação asfáltica.** COPPE–Universidade Federal do Rio de Janeiro. Ilha do Fundão–RJ, 2011.

TEIXEIRA, C. C. R. **Avaliação do potencial de ligantes à base de Sódio e cinzas volantes na estabilização de solos – Comparação com soluções tradicionais.** 2010. 78 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 2010.

UIENO, M. S. **Estudo da Estabilização Granulométrica de Solos da Região de SINOP – MT, para Fins de Pavimentação.** 2011. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Estado do Mato Grosso, Mato Grosso, 2011.

ZHANG, Z. e TAO, M. (2008) **Durability of cement stabilized low plasticity soils, Journal Of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE,** pgs 203-213.