



Universidade Federal do Amazonas
Faculdade de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em
Ciência e Engenharia de Materiais



COMPÓSITOS COM BIOCHAR E CARVÃO VEGETAL PARA CAMADAS DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

ALEMAR PEREIRA TORRES

MANAUS
2018

ALEMAR PEREIRA TORRES

**COMPÓSITOS COM BIOCHAR E CARVÃO VEGETAL PARA
CAMADAS DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**

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

Linha de pesquisa: Pavimentação.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Consuelo Alves da Frota

MANAUS
2018

Ficha Catalográfica

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

T693c Torres, Alemar Pereira
Compósitos com biochar e carvão vegetal para camadas de pavimentos asfálticos / Alemar Pereira Torres. 2018
69 f.: il. color; 31 cm.

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

1. Flexão a quatro pontos. 2. Biochar. 3. Carvão vegetal. 4. Módulo complexo. 5. Ângulo de fases. I. frota, Profa Dra Consuelo Alves da II. Universidade Federal do Amazonas III.
Título

ALEMAR PEREIRA TORRES

**COMPÓSITOS COM BIOCHAR E CARVÃO VEGETAL PARA
CAMADAS DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**

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

Linha de pesquisa: Pavimentação.

Aprovado em 18 de junho de 2018.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a. Dr.^a. Consuelo Alves da Frota, Presidente
Universidade Federal do Amazonas

Prof. Dr. Leandro Aparecido Pocrifka, Examinador Interno
Universidade Federal do Amazonas

Prof. Dr. Newton Paulo de Souza Falcão, Examinador Externo
Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia

Dedico esse trabalho aos meus pais,
Alemar e Francisca, a minha irmã
Kassia e minha esposa Paula.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, acima de tudo, a Deus, pela força dada durante todos esses meses no processo de pós-graduação, nos momentos de fraqueza mostrou-me que não existem adversidades neste mundo maiores do que Ele. O dom da minha vida como um todo, e todas as conquistas que realizei até hoje, atribuo ao meu Senhor Jesus, que me tirou do opróbrio em que vivia e escreveu-me uma nova história.

“Tudo é possível ao que crê” - Mc 9.23

Agradeço a minha família que sempre acreditou em mim, apoiando-me no decorrer de minha vida acadêmica. Aos meus pais, Alemar e Francisca, e minha irmã Kassia que sonharam juntamente comigo um futuro vitorioso o qual vislumbramos hoje.

Agradeço a minha esposa querida, Paula, o sol da minha vida, que deu um sentido para minhas conquistas acadêmicas e profissionais, bem como me ajudou a ser um homem melhor.

À Universidade Federal do Amazonas (UFAM), nosso maior patrimônio, e ao PPGCEM que me proporcionou o caminho para a realização de mais esse sonho. O profissional que sou hoje devo a minha querida UFAM.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), a qual auxiliou financeiramente nessa jornada.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), ao professor Dr. Newton Falcão, o qual disponibilizou o Biochar utilizado nesta pesquisa.

À construtora ARDO que forneceu sua dosagem e os agregados para a pesquisa realizada em misturas asfálticas.

À construtora ETAM que permitiu a retirada do solo argiloso em um trecho da Avenida das Flores.

Agradeço aos colegas do Geotec, que disponibilizaram parte de seu tempo para ensinar a realização dos ensaios envolvendo solo e misturas asfálticas.

Aos professores que contribuíram para a minha formação, em especial a minha orientadora, professora Dr^a Consuelo Frota, que me fez reaver um potencial técnico o qual estava adormecido, despertando novamente o sonho por uma carreira acadêmica, a qual já é uma realidade. Muito obrigado por tudo professora!

*Algo só é impossível até que alguém
duvida e resolve provar o contrário.*

Albert Einstein

RESUMO

O biochar é um carvão vegetal oriundo da carbonização de biomassa sob baixa atmosfera de oxigênio. Sua origem deve-se ao estudo desenvolvido na chamada “terra preta de índio”, a qual melhora consideravelmente as propriedades agrícolas de um solo. No trabalho em pauta analisa-se a influência do biochar como partícipe de compósitos com solo e misturas asfálticas, por meio do ensaio de flexão a quatro pontos. Também se comparam tais resultados relativos as respostas das formulações com a presença do carvão vegetal nativo da região amazônica. Para tal moldaram-se os corpos de prova de formato prismático do solo argiloso natural (SN), solo-carvão vegetal (SCV), solo-biochar (SBC), concreto asfáltico (CA), concreto asfáltico-carvão vegetal (CACV) e concreto asfáltico-biochar (CABC). Os resultados registraram que o biocarvão, participante em compósitos com o solo argiloso, melhorou as propriedades de rigidez, com a finalidade de seu emprego em base e sub-base de pavimentos, culminando em maiores valores para módulo complexo respeitante as misturas com o carvão vegetal. Alusivo aos compósitos asfálticos com biochar e carvão vegetal, verificou-se para ambos valores de rigidez inferior ao concreto asfáltico padrão, considerando temperatura média de 25°C. No entanto, para a temperatura de 40°C, representativa da superfície dos pavimentos da cidade de Manaus, tais formulações se mostraram mais vantajosos frente ao concreto referência, concebendo uma alternativa para a consecução de sistemas viários com melhor desempenho na região Amazônica.

Palavras-chave: Flexão a quatro pontos, módulo complexo, ângulo de fase, biochar, carvão vegetal, concreto asfáltico, solo.

ABSTRACT

Biochar is a charcoal derived from the carbonization of biomass under a low oxygen atmosphere. Its origin is due to the study developed in the so-called "Indian black earth", which considerably improves the agricultural properties of a soil. In the work under study the influence of biochar as a participant of composites with soil and asphalt mixtures is analyzed by means of the four point bending test. We also compare these results regarding the responses of the formulations with the presence of native charcoal from the Amazon region. For this, prismatic formations of natural clay soil (SN), soil-charcoal (SCV), soil-biochar (SBC), asphalt concrete (CA), asphalt-charcoal concrete (CACV) and concrete asphalt-biochar (CABC). The results showed that the biomass, which participates in composites with the clay soil, improved the stiffness properties, with the purpose of its use in base and sub-base of pavements, culminating in higher values for complex module regarding the mixtures with charcoal . All asphaltic composites with biochar and charcoal were verified for both values of stiffness inferior to the standard asphalt concrete, considering average temperature of 25°C. However, for the 40°C temperature, representative of the surface of the pavements of the city of Manaus, these formulations proved to be more advantageous in comparison to the concrete reference, conceiving an alternative for the achievement of road systems with better performance in the Amazon region.

Keys-words: Four-point bending, complex module, phase angle, biochar, charcoal, asphalt concrete, soil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Estrutura de pavimento flexível e rígido.....	20
Figura 2.1 – Principais equipamentos usados em terraplenagem.....	21
Figura 2.2 – Execução de aterro em camadas.	22
Figura 2.3 – Reforço do subleito na Av. das Torres em Manaus/AM.....	22
Figura 2.4 – Reforço do subleito em rachão – Complexo viário do São José em Manaus/AM.....	23
Figura 2.5 – Agregado sintético de argila calcinada - ASAC.	24
Figura 2.6 – Base executada em solo melhorado com cimento.	25
Figura 2.7 – Base executada em BGTC – Complexo viário do São José em Manaus/AM.....	25
Figura 2.8 – Base reciclada executada no Jorge Teixeira em Manaus/AM.	26
Figura 2.9 – Stone Matrix Asphalt	27
Figura 2.10 – Execução de revestimento em concreto betuminoso usinado a quente. ...	28
Figura 2.11 – a) Fruto do açaí. b) Fibra proveniente do açaí da Amazônia.	30
Figura 2.12 – Carvão vegetal.....	30
Figura 2.13 – Argila vermelha e cinzas volantes de carvão usados em estabilização de bases.	31
Figura 2.14 – Biomassa de cana-de-açúcar.	31
Figura 2.15 – Biochar comparado à fibra de carbono e ao negro de fumo.	32
Figura 2.16 – Microscopia do biochar comparado à fibra de carbono e ao negro de fumo.....	32
Figura 2.17 – Viga isostática proposta no teste de flexão a 4 pontos.....	33
Figura 2.18 – Diagrama de momento fletor oriundo do teste de flexão a 4 pontos.	34
Figura 2.19 – Viga conjugada nas condições de cargas no teste de flexão a 4 pontos....	34
Figura 2.20 – Pulso de tensão e correspondente pulso de deformação.	35
Figura 2.21 – Esquema gráfico do módulo complexo.....	37
Figura 3.1 – Brita granítica mediante sua granulometria.	38
Figura 3.2 – Areia média típica.	39
Figura 3.3 – CAP a ser utilizado foencido pela REMAN.	39
Figura 3.4 – a) Solo; b) Localização da jazida	40
Figura 3.5 – Biochar oriundo de biomassa típica da região amazônica.	41
Figura 3.6 – Carvão vegetal típico da Região Amazônica.	41
Figura 3.7 – Máquina para ensaio de flexão a 4 pontos.	43

Figura 3.8 – Sistema estrutural característico da flexão a 4 pontos.	44
Figura 3.9 – a) Forma para CP's; b) CP moldado	45
Figura 3.10 – Prensa do GEOTEC usada para moldagem de corpo de prova prismático.	45
Figura 4.1 – Limite de liquidez (LL) do solo natural.	46
Figura 4.2 – Curva granulométrica do solo natural.....	47
Figura 4.3 – Curvas de compactação.....	48
Figura 4.4 – Vigas de solo natural.....	51
Figura 4.5 – Vigas de solo para ensaio de flexão a 4 pontos.	52
Figura 4.6 – Viga de solo natural (SN) no equipamento de flexão a 4 pontos.	53
Figura 4.7 – Viga de solo-carvão vegetal (SCV) no equipamento de flexão a 4 pontos	53
Figura 4.8 – Força e deslocamento em função do tempo, viga SN. ...	54
Figura 4.9 – Força e deslocamento em função do tempo, viga SCV. ...	54
Figura 4.10 – Força e deslocamento em função do tempo, viga SBC.	54
Figura 4.11 – Ângulo de fase, vigas SN, SCV e SBC	55
Figura 4.12 – Módulo complexo x frequência, vigas SN, SCV, e SBC.	56
Figura 4.13 – Vigas de concreto asfáltico para ensaio de flexão a 4 pontos.	57
Figura 4.14 – Viga de concreto asfáltico no equipamento de flexão a 4 pontos.	57
Figura 4.15 – Força e deslocamento para vigas CA.	58
Figura 4.16 – Força e deslocamento para vigas CACV. ...	58
Figura 4.17 – Força e deslocamento para vigas CABC.	59
Figura 4.18 – Ângulo de fase das vigas de concreto asfáltico CA, CACV e CABC. ...	60
Figura 4.19 – Módulo complexo x frequência das misturas asfálticas CA, CACV e CABC. ...	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Compósitos para subcamadas com solo + modificador	42
Tabela 3.2 - Compósitos para revestimento asfáltico com CBUQ + modificador	43
Tabela 4.1 - Densidade real dos agregados para CA.....	48
Tabela 4.2 - Especificações do cimento asfáltico de petróleo (CAP).	49
Tabela 4.3 - Dosagem de corpos de prova de solo	50
Tabela 4.4 - Dosagem de corpos de prova de Concreto asfáltico.....	50
Tabela 4.5 - Grau de compactação, vigas de solo	51
Tabela 4.6 - Massa específica das misturas asfálticas.	51
Tabela 4.7 - Corpos de prova de solo natural (SN) e compósitos (SCV e SBC)	52
Tabela 4.8 - Corpos de prova de concreto asfáltico para ensaio de flexão a 4 pontos	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
AAUQ	Areia asfalto usinada a quente
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás natural e Biocombustíveis
ASAC	Agregado Sinterizado de Argila Calcinada
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BGTC	Brita Graduada Tratada com Cimento
BPM	Borracha de Pneu Moído
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBR	<i>Califórnia Bearing Ratio</i>
CBUQ	Concreto Betuminoso usinado a quente
CP	Corpo-de-Prova
CPA	Camada Porosa de Atrito
DNIT	Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes
EVA	Etileno Acetato de Vinila
GC	Grau de compactação
GEOTEC	Grupo de Geotecnia
Gsa	Densidade real
Gsb	Densidade aparente
Gsbssd	Densidade aparente na condição superfície saturada
INPA	Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
RCD	Resíduo de Construção Civil
SBS	Estreno-butadieno-Estireno
SMA	<i>Stone Matrix Asphalt</i>
TPI	Terra Preta dos Índios
TSD	Tratamento Superficial Duplo
TSS	Tratamento Superficial simples
TST	Tratamento Superficial Triplo
UTM	<i>Universal Technical Machine</i>
E*	Módulo complexo
T	Período

f	Frequência
ω	Pulsação
$\rho_{dm\acute{a}x}$	Massa específica aparente seca máxima
$w_{\acute{o}t}$	Umidade ótica
SN	Compósito de Solo natural
SCV	Compósito de solo natural – carvão vegetal
SBC	Compósito de solo natural – Biochar
CA	Compósito de Concreto asfáltico
$CACV$	Compósito de Concreto asfáltico – carvão vegetal
$CABC$	Compósito de Concreto asfáltico – Biochar
δ	Ângulo de fase

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	17
1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Objetivos	18
1.1.1 Objetivo geral.....	18
1.1.2 Objetivos específicos	19
1.2 Organização da Dissertação	19
CAPÍTULO 2	20
2 REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1 Pavimento	20
2.2 Subcamadas de pavimentos flexíveis	21
2.2.1 Terraplenagem e definição do greide.....	21
2.2.2 Reforço do subleito	22
2.2.3 Base e sub-base de um pavimento	23
2.2.4 Estabilização de subcamadas	24
2.3 Misturas asfálticas	26
2.3.1 Compósitos asfálticos de maior empregabilidade.....	26
2.3.2 Concreto betuminoso usinado a quente – CBUQ/CA.....	28
2.4 Modificadores de compósitos usados em pavimentação.....	29
2.4.1 Alguns exemplos de modificadores	29
2.4.2 O carvão vegetal e o biochar.....	30
2.5 Fundamentação teórica	33
2.5.1 Desempenho mecânico por flexão a quatro pontos	33
CAPÍTULO 3	38
3 MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1 Materiais Utilizados	38
3.1.1 Brita	39
3.1.2 Areia e Cimento Asfáltico de Petróleo	39
3.1.3 Solo	40
3.1.4 Biochar e Carvão vegetal	41
3.2 Dosagem.....	42
3.2.1 Solo-carvão e Solo-biochar	42
3.2.2 Composições asfálticas.....	42
3.3 Comportamento Mecânico	43
3.3.1 Ensaios de flexão a 4 pontos em vigas.....	43
CAPÍTULO 4	46
4 RESULTADOS E ANÁLISES	46
4.1 Caracterização Física – solo e composições.....	46
4.1.1 Solo - Limites de Atteberg, massa específica dos sólidos, granulometria e classificações	46
4.1.2 Solo e Composições - Compactação.....	47
4.2 Caracterização Física – agregados e cimento asfáltico de petróleo	48
4.3 Dosagem.....	49
4.4 Moldagem dos corpos de prova.....	50
4.5 Flexão a quatro pontos	52
4.5.1 Vigas de solo.....	52
4.5.2 Vigas de concreto asfáltico	56

CAPÍTULO 5.....	62
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	62
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

A humanidade em seu constante desenvolvimento sempre necessitou dos meios de transporte para se deslocar no menor intervalo de tempo possível. Nesse contexto, são vários os modais que se destacam, dentre eles o transporte aquaviário, constituindo-se em um dos mais antigos no que se refere a relatos históricos. Originário no tempo dos Fenícios, este modal caracterizava-se por navios movidos a remo. Na sequência com a descoberta das velas iniciou-se a fase das conquistas territoriais e o desbravar dos mares, dando destaque inicialmente aos Vikings nos séculos VIII e IX, que por intermédio de seus *drakens*, tornaram-se exímios navegadores descobrindo a Islândia e a Groelândia. Em meados dos séculos XV e XVI com o surgimento dos instrumentos náuticos e com a fundação da Escola de Sagres em Portugal, teve início a era das grandes navegações, com inúmeras conquistas como a descoberta da América por Cristóvão Colombo em 1492 e a abertura do caminho para as Índias por intermédio de Vasco da Gama em 1498. A navegação se consolidou em meados do século XIX com a revolução industrial, substituindo as velas por motores a vapor.

Outro modal a ser destacado de extrema importância na atualidade é o transporte aéreo, sendo o mais novo de todos. Porém, idealizado desde os tempos de Leonardo Da Vinci em 1506, veio a tornar-se realidade a partir das experiências com balões na chamada ‘era dos balões’. Nessa época, destacou-se por sua proeza o padre brasileiro Bartholomeu Bueno em 1709, realizando experiência bem-sucedida com balão de ar quente diante da corte do rei português D. João V. No mesmo período Montgolfier, em 1783, fez ascender um balão contendo animais diante do rei da França Luís XVI. Na sequência o transporte aéreo se consolidou com o invento do avião, cuja autoria é até os dias de hoje polemizada, em face das realizações dos irmãos Wright em 1903, ao conseguirem efetuar o voo do primeiro avião à gasolina utilizando uma catapulta, ao passo que o brasileiro Santos Dumont com o voo do 14 bis na praça de Bagatelle em Paris, o fez com propulsão própria diante das autoridades francesas (Razzolini, 2012).

Dentre os modais de transporte, as estradas sempre foram literalmente os caminhos para o desenvolvimento e a expansão da humanidade, sendo indispensáveis para o transporte terrestre desde os antigos veículos movidos à tração animal até os modernos automóveis. Segundo os historiadores, construíram-se as vias mais antigas há mais de três mil anos antes de Cristo pelo rei egípcio Quéops, sendo estas, estradas com pedras. Sua finalidade era

proporcionar os caminhos por onde passavam os imensos blocos de pedra que visavam à edificação de suas pirâmides.

Dentre os povos antigos, dois se destacaram na construção de estradas, os persas e os romanos, com o fito de unificar seus impérios. Desses, os romanos foram peritos na edificação de estradas começando em 312 a.C., com a chamada via Ápia. No total, os romanos foram responsáveis por 350.000 km de estradas de pedra que interligavam Roma as mais variadas localidades como a Gália, a Espanha, a Grécia e a Inglaterra. Durante a idade média as estradas ficaram abandonadas, voltando a serem “lembradas” após a guerra dos cem anos. Em 1747 a França criou a Escola de Pontes e Estradas visando formar técnicos. Porém, nesta época o destaque registrou-se com os ingleses, sobretudo com a descoberta de Mac Adam criando um meio barato de se pavimentar (Maré, 2011).

Com a ampliação do setor automotivo, as rodovias tornaram-se de fundamental importância no que tange ao transporte de pessoas e mercadorias. No Brasil, este modal constitui-se no seu principal meio de transporte representando 62%, a despeito do país ser dotado de uma considerável malha hídrica, bem acima da rodoviária. A primeira estrada construída no país, deu-se no período colonial, sendo a maior edificação da América Latina na época, a denominada *União da Indústria*, interligando Minas Gerais ao Rio de Janeiro (Bastos, 1991).

Apesar de caracterizar-se como o principal modal nacional, as condições atuais de conservação das rodovias são classificadas como regulares, ruins ou péssimas, segundo pesquisa realizada pela Confederação Nacional do Transporte, num total de 48,32% dos 103,26 km pesquisados. O fato é, que apenas 12% das rodovias do país são pavimentadas, o que acarreta sérios problemas de mobilidade, assim como um custo operacional da frota nacional da ordem de 25% a mais do que deveria ser segundo boletim informativo do referido órgão (CNT, 2016).

Um fator determinante que contribui para a supracitada problemática consiste na escassez de agregados pétreos, motivando a busca por novas alternativas para a substituição desses, de modo a suprir essa necessidade, em particular na Região Amazônica, por uma técnica rodoviária superior e que, sobretudo, não impacte o meio ambiente.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Analisar o comportamento mecânico de compósitos aditados separadamente com

biochar e carvão vegetal, comparando-os com as formulações tradicionais não modificadas, com vistas à construção de pavimentos.

1.1.2 Objetivos específicos

- a) Caracterizar o solo argiloso, ante a granulometria, consistência, e os parâmetros de compactação;
- b) Determinar os parâmetros de moldagem das composições solo-aditivo e das misturas asfálticas;
- c) Determinar o comportamento mecânico do solo e das composições solo-biochar e solo-carvão vegetal para subcamadas, frente ao ensaio de flexão a quatro pontos;
- d) Avaliar o comportamento mecânico de misturas asfálticas, do tipo CA, e tendo a participação do biochar e carvão vegetal, por meio do ensaio de flexão a 4 pontos;
- e) Comparar os resultados das composições tradicionais relativas as formulações com a participação do biochar e carvão vegetal;
- f) Buscar alternativas técnicas para a pavimentação na Região Amazônica, lançando mão de materiais típicos da região.

1.2 Organização da Dissertação

A presente pesquisa está distribuída em cinco etapas, na seguinte disposição:

Capítulo 1: Abordar-se à introdução e os objetivos a serem alcançados;

Capítulo 2: Reúne-se a revisão bibliográfica que embasará o estudo, frisando todas as etapas da construção de um pavimento flexível, desde o preparo e tratamento do solo de fundação (terraplenagem), até a construção das diversas sub-camadas dessa estrutura (reforço do subleito, sub-base, base e revestimento asfáltico). Nessa etapa será também apresentado os novos materiais (carvão vegetal e biochar) e a fundamentação teórica concernente ao ensaio de flexão a quatro pontos;

Capítulo 3: Descrevem-se os materiais que serão usados na pesquisa, tais como o solo argiloso de Manaus, o biochar, o carvão vegetal, a brita, a areia e o cimento asfáltico de petróleo, bem como os métodos a serem adotados para caracterizar os compósitos;

Capítulo 4: Apresentam-se e discutem-se os resultados;

Capítulo 5: São explanadas as conclusões ante a pesquisa e sugestões para futuros trabalhos.

CAPÍTULO 2

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Pavimento

Pavimento, de forma geral, é um conjunto de várias camadas, com dimensões finitas, destinadas a transmitir os esforços verticais e tangenciais oriundos do tráfego dos veículos. Tem como finalidade propiciar aos usuários condições de rolamento, com conforto, economia e segurança. Tal sistema é construído sobre a cota final da terraplenagem, podendo empregar diversos materiais na constituição de suas camadas, denominadas como: reforço do subleito, sub-base, base e revestimento. No entanto, é frequente a supressão de algumas dessas camadas.

Dependendo do tipo de revestimento, o pavimento pode ser classificado em flexível ou rígido. O primeiro tipo distingue-se por ser constituído por uma mistura do asfalto (ligante), agregados graúdos e miúdos. Possui essa denominação devido ao comportamento visco-elástico que apresenta ante as cargas provenientes do tráfego. Essa primeira camada é responsável por resistir os carregamentos e as ações climáticas, além de garantir a impermeabilização estradal. Ressalta-se que a água se mostra como um agente extremamente nocivo à estabilidade dessa estrutura. As demais subcamadas destinam-se também a distribuir e minorar os efeitos das cargas que incidem no conjunto. Por analogia, o pavimento rígido igualmente é formado por um sistema de camadas, em cujo revestimento participa o cimento Portland (ligante), na formação de placas de concerto (armadas ou não). Na Figura 1.1 tem-se um desenho esquemático exemplificando essas estruturas.

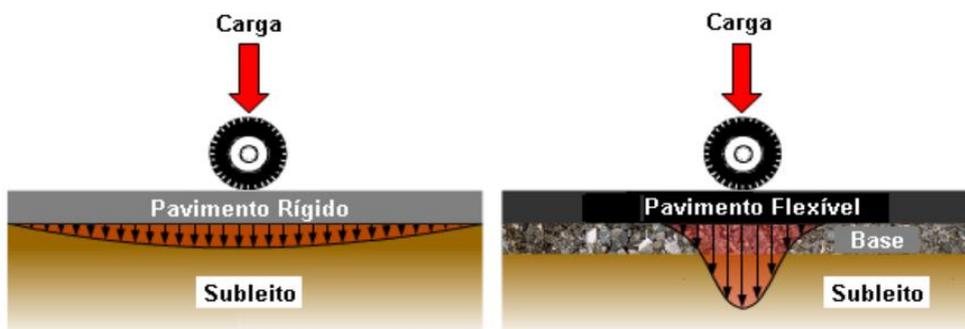


Figura 1.1 – Estrutura de pavimento flexível e rígido

Fonte: Araújo, 2016

2.2 Subcamadas de pavimentos flexíveis

2.2.1 Terraplenagem e definição do greide

O movimento de terra ou simplesmente terraplenagem, é a fase executiva da construção de uma rodovia. Tem início logo após a definição dos processos básicos relativos ao projeto geométrico, tais como os estudos preliminares, hidrológicos e geológicos; definição do traçado estradal e dos elementos planialtimétricos; e cálculo dos volumes de terra em seguida a conformação das seções transversais.

De acordo com Lee (2015) a execução da terraplenagem envolve em síntese a escavação e carga para a remoção de solo natural do local de origem. Na sequência tem-se o transporte do mesmo até a localidade de destino, onde será espalhado e compactado na umidade ótima e massa específica aparente seca máxima mediante a aplicação de uma energia de compactação.

A terraplenagem pode ainda ser conceituada como um processo mecânico, em que o subleito natural do terreno é escavado para remoção de toda matéria orgânica. Em seguida inicia-se um ciclo de cortes e aterros sobre o terreno até atingir a cota projetada para o greide. Para tal, o material retirado poderá ser lançado sobre o local de aterro, ocorrendo, assim, a chamada compensação de volumes. A determinação de seus parâmetros técnicos (limite de liquidez, limite de plasticidade, peso específico seco máximo e umidade ótima) são de fundamental importância.

Todo processo de execução da terraplenagem é mecanizado. Nos dias atuais são utilizados equipamentos modernos para a consecução do referido procedimento. Desses, os mais comuns são: trator de esteiras com lâmina, motoniveladora, retroescavadeira, rolo compactador, moto-scaper e pá mecânica. Na Figura 2.1 tem-se os principais equipamentos empregados nessa etapa da construção de um pavimento.



Figura 2.1 – Principais equipamentos usados em terraplenagem

Fonte: <http://pedreiro.com.br/equipamentos-de-terraplenagem-passo-a-passo>

O aterro de uma rodovia é executado com o lançamento do solo em camadas, não ultrapassando, em geral, o limite de 20 cm, para que a energia imprimida no maciço se distribua o mais uniforme possível. No que tange ao seu controle tecnológico, o material lançado no leito estradal, em linhas gerais, deve possuir grau de compactação de 95 a 100% do Proctor normal, intermediário ou modificado. Na prática das obras civis, esse parâmetro pode ser identificado, lançando mão da experiência, como um teor que se encontra um pouco abaixo do limite de plasticidade, num estado semi-sólido do material (Pinto, 2006).

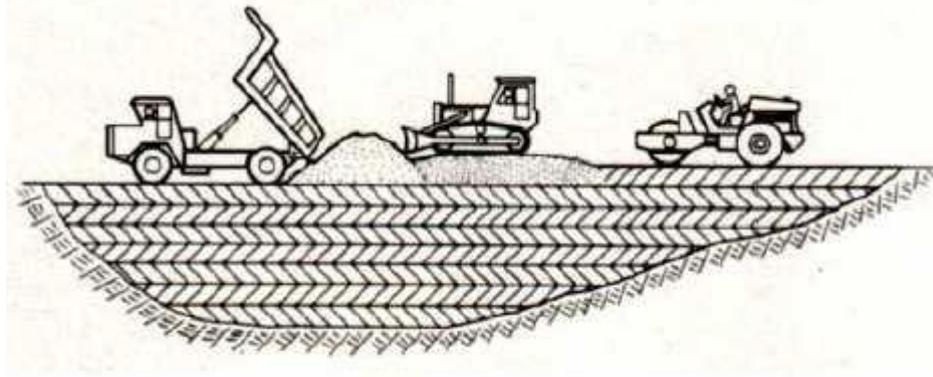


Figura 2.2 – Execução de aterro em camadas

Fonte: Ribeiro, 200

2.2.2 Reforço do subleito

Após terraplenagem, em alguns casos faz-se necessário, antes de lançar a camada de sub-base, a construção de uma camada de reforço devido a baixa capacidade de suporte do terreno natural, ou há previsão de cargas muito pesadas. O solo de fundação de uma estrada, não pode apresentar CBR menor que 10% e expansão maior que 2%, essa também é uma condição para que haja obrigação dessa camada. A sua espessura mínima é da ordem de 10cm.



Figura 2.3 – Reforço do subleito na Av. das Torres em Manaus/AM

Fonte: Autor, 2009

Os materiais adotados na construção do reforço do subleito podem ser desde solos argilosos, misturas diversas (areia, pedregulhos, piçarras) e técnicas mais modernas, como exemplo o uso de geogrelhas na estabilização de solos moles (Lemos, 2013). É comum também o emprego de pedra rachão para garantir uma maior capacidade de suporte.



Figura 2.4 – Reforço do subleito em rachão – Complexo viário do São José em Manaus/AM
Fonte: Autor, 2011

2.2.3 Base e sub-base de um pavimento

Camadas de extrema importância, a sub-base e a base são as principais responsáveis por resistir aos esforços oriundos do tráfego de uma rodovia, cujos parâmetros de suporte devem ser rigorosamente controlados. A sub-base é construída imediatamente acima da camada de reforço, ao passo que a base se localiza acima da sub-base. Ambas têm função estrutural no pavimento, sendo edificadas com espessura que variam, em média, de 15 a 30 cm.

No que tange aos parâmetros técnicos, as sub-bases devem possuir CBR mínimo de 30% e expansão máxima de 1%. No caso das bases o CBR mínimo admitido oscila na ordem de 60% e expansão menor que 0,5%. O grau de compactação adotado na maioria dos casos é igual a 100% do Proctor intermediário (Júnior, 2014). Conforme preconiza a publicação 719 do Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), os materiais empregados nessas subcamadas podem ser classificados como: terrosos, pétreos e diversos (solos residuais, areia, brita e cascalhos).

2.2.4 Estabilização de subcamadas

A estabilização das camadas de um pavimento pode ser realizada por meio físico ou químico. No primeiro processo (físico) tem-se as inclusões granulométricas, cuja mescla de agregados de graduação variada proporciona um notório aumento na capacidade de suporte de uma rodovia. A estabilização química, por sua vez, consiste em agregar um “modificador” a um solo, sendo tal aditivo o responsável por proporcionar uma resistência maior à camada.

Essas metodologias são, em regra, usadas na adequação de subcamadas as prescrições de normas e projetos, bem como vão de encontro uma tendência mais moderna na busca por novos materiais, na tentativa de minorar os impactos ambientais oriundos da extração, principalmente de agregados graúdos, como o seixo rolado, característico do leito dos rios.

Várias linhas de pesquisa têm sido desenvolvidas permitindo o uso desses materiais alternativos, caso do agregado sintético de argila calcinada (ASAC) (Silva, 2009), resíduos industriais, e aditivos, tais como: o cimento portland, a cal hidráulica e as cinzas volantes (Collantes, 2014).

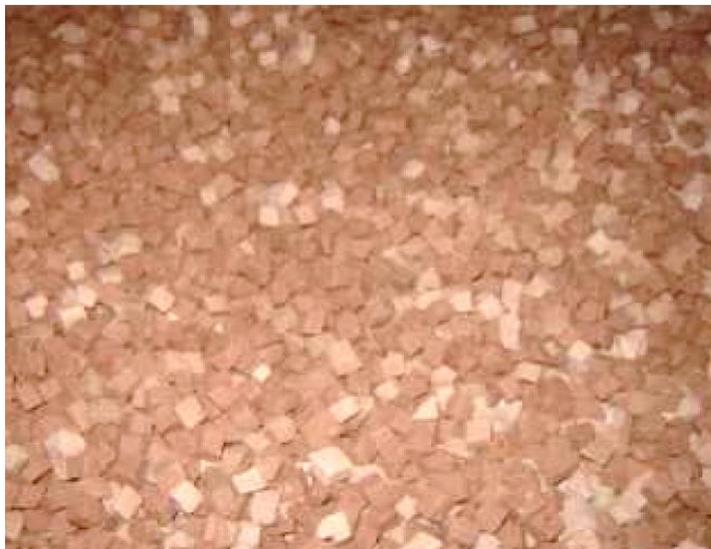


Figura 2.5 – Agregado sintético de argila calcinada - ASAC

Fonte: Silva, 2009

Alternativas complementares são àquelas formadas pelo uso da fresa do revestimento asfáltico, incorporada aos solos. Essa é uma forma de otimizar os serviços e minorar o impacto ambiental oriundo do descarte do revestimento asfáltico envelhecido (Moreira,

2005). Também tem destaque a utilização de agregados oriundos de resíduos da construção civil (RCD) (T. Aatheesan, 2009), tais como tijolos e concreto, areia de fundição (Klinsky, 2009), bem como o reforço estrutural por meio de geossintéticos (Lages, 2003). Exemplifica-se, igualmente, o denominado solo melhorado com cimento, sendo esse uma mescla de solos e cimento Portland. A composição pode ser do tipo simples ou composto (com teores em torno de 2 a 4%), gerando uma rígida camada com características que lembram um concreto de cimento portland convencional. Também são comuns em engenharia rodoviária, compósitos que mesclam a estabilização física e química tais como o BGTC (brita graduada tratada com cimento), na busca uma capacidade de suporte superior para as subcamadas.



Figura 2.6 – Base executada em solo melhorado com cimento

Fonte: <http://vogelsangerempreendimentos.com.br/site/wp-content/uploads/2011/08/base.jpg>



Figura 2.7 – Base executada em BGTC – Complexo viário do São José em Manaus/AM

Fonte: Autor, 2011



Figura 2.8 – Base reciclada executada no Jorge Teixeira em Manaus/AM

Fonte: Autor, 2014

2.3 Misturas asfálticas

2.3.1 *Compósitos asfálticos de maior empregabilidade*

A camada final que se destina a receber diretamente os esforços verticais e tangenciais provenientes do tráfego de veículos é denominada revestimento. Compreende o extrato responsável por impermeabilizar o pavimento, impedindo que a água das chuvas penetre atingindo e degradando a estratigrafia inferior. Pode ser ainda conceituada como a camada destinada a resistir ao desgaste imposto pelo movimento dos veículos, com execução procedida por detalhados ensaios de dosagem.

Pode ser implementada com vários materiais, tais como: o concreto armado, tijolos cerâmicos e pisos intertravados. No entanto, o tipo de revestimento mundialmente usado na pavimentação da malha rodoviária é o chamado revestimento asfáltico, sendo esse um compósito a base de betume.

As referidas camadas betuminosas apresentam-se segundo diversas misturas. Dessas, as mais conhecidas são o concreto betuminoso usinado à quente (CBUQ) e areia asfalto usinada à quente (AAUQ). Particularmente o CBUQ ou CA é a composição asfáltica mais empregada no Brasil. Por outro lado, o AAUQ constitui uma argamassa asfáltica (CAP, areia e fíler) produzida e manipulada à quente, amplamente empregada em regiões com escassez do agregado pétreo graúdo. É regida pela norma DNIT ES 032/2005 do DNIT, sendo normalmente empregada em revestimentos de tráfego leve ou estradas

vicinais.

Os compósitos porosos são destaque à parte dentre as misturas asfálticas. Tem-se como as mais conhecidas: a camada porosa de atrito (CPA) e a Stone Matrix Asphalt (SMA) (Brown, 1997). Ambas possuem uma macrotextura superficial com grande porcentagem de vazios, que proporciona um escoamento melhor das águas pluviais da pista para as sarjetas. Diminuindo, assim, a lâmina d'água e proporcionando um maior atrito entre os pneus dos veículos e a pista. No caso do CPA, este possui vazios da ordem de 18 a 25% e uma camada inferior impermeável, com pequenas quantidades de fíler e agregado miúdo. Uma aplicação no Brasil pode ser observada no Aeroporto Santos Dumont no Rio de Janeiro/RJ. A SMA, por sua vez, difere do CPA, por não precisar de camada inferior impermeável e ser dotado de vazios da ordem de 4 a 6%. É composto por grande quantidade de agregados graúdos e preenchido com areia, fíler, ligante e fibras (outra diferença relativa ao CPA). Suas faixas granulométricas e propriedades são ditadas pela norma norte-americana AASHTO MP8-02, e na compactação Superpave para faixas de agregado máximo 19,0, 12, 5 e 9,5 mm. A SMA comumente possui ligante modificado com polímeros, sendo usado em paradas de ônibus, pistas de aeroportos e vias para caminhões.

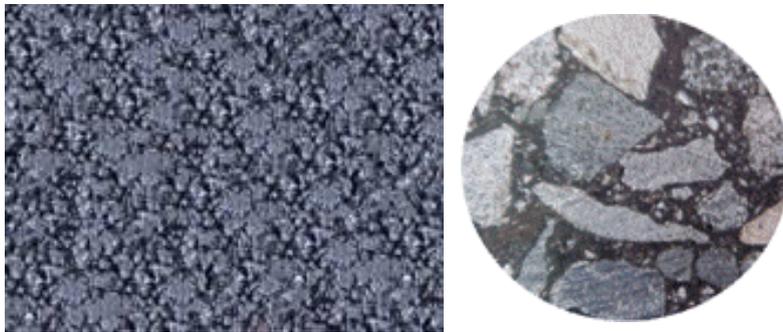


Figura 2.9 - Stone Matrix Asphalt

Fonte: <http://www.cahpiconsultoria.com.br/index.php/mistura-de-sma/>

Outro tipo de revestimento asfáltico que vem sendo empregado em vias de tráfego leve, tais como vicinais e similares, os chamados tratamentos superficiais, ou simplesmente TS. Consistem em uma camada de agregados lançada na pista seguida de outra camada de ligante ou vice-versa. São compactadas *in loco*, ou seja, não há mistura prévia. Quando o ligante é espalhado primeiro, caracteriza a chamada penetração invertida. Seu acabamento não possui função estrutural considerável, porém impermeabilizante e antiderrapante. Podem ser do tipo tratamento superficial simples (TSS), tratamento superficial duplo (TSD) e tratamento superficial triplo (TST), mediante a quantidade de camadas alternadas de agregados e ligante, tendo as camadas superiores menor graduação.

Formulações do tipo recicladas também são trabalhadas mediante a inserção de agentes rejuvenecedores em revestimentos envelhecidos e degradados, removidos da pista por meio de corte com fresadora de asfalto.

Os materiais mundialmente utilizados em misturas asfálticas são os do tipo pétreo e artificial. Como agregado pétreo, os principais representantes são o seixo e a brita. Dentre os artificiais pode-se citar: o agregado sinterizado de argila calcinada (ASAC) e o resíduo de construção e demolição (RCD). Referente ao ligante amplamente encontrado nessas composições, tem-se o cimento asfáltico de petróleo (CAP), como o mais comum o de penetração 50/70, ao passo que os materiais de enchimento (fíler) são representativos o cimento e o pó de pedra.

2.3.2 Concreto betuminoso usinado a quente – CBUQ / CA

O CBUQ, como mencionado anteriormente, é um concreto asfáltico constituído por ligante betuminoso, agregado graúdo, agregado miúdo e material de enchimento. É o tipo de revestimento mais empregado no Brasil, devido seus parâmetros de resistência satisfazerem aos requisitos mínimos exigidos para os mais variados volumes de tráfego. Sua curva granulométrica contínua e bem graduada, sendo regido pela ES 031/2006 do DNIT. É dosado no Brasil em 3 faixas de agregados (A, B e C, tendo como característica propriedades muito sensíveis a variação da temperatura.

Quando a espessura da massa asfáltica for maior que 70 mm, é comumente dividido em duas camadas, a inferior denominada binder (camada intermediária) e a superior chamada de capa (camada de rolamento). O teor de ligante oscila em torno de 4,5 a 6%. Fundamental, ainda, é citar-se que possui vazios da ordem de 3 a 5% (capa) e 4 a 6% para o binder. Ressalta-se que tais vazios devem existir, porquanto sua ausência ocasiona significativa deformação por fluência.



Figura 2.10 – Execução de revestimento em concreto betuminoso usinado a quente
Fonte: <http://pedreiro.com.br/misturas-betuminosas-cbuq-cap-rr-cm-passo-a-passo/>

2.4 Modificadores de compósitos usados em pavimentação

2.4.1 Alguns exemplos de modificadores

A busca incessante pela obtenção de produtos asfálticos de alto desempenho mecânico tem movido pesquisadores do ponto de vista global e propor alternativas inovadoras. Para tal, tem-se lançado mão dos chamados modificadores, sendo esses materiais diversos, naturais ou produzidos de forma artificial, que ao serem aditivados à mistura betuminosa interferem em suas propriedades físicas e mecânicas, proporcionando uma melhora no compósito.

Frente a isso, são variados os tipos de materiais que têm sido empregados como modificadores em pavimentação, tal como os polímeros. O EVA, por exemplo, um copolímero de etileno e acetato de vinila, usado na indústria calçadista (Bringel, 2005), modifica as propriedades reológicas do CAP causando um aumento da viscosidade e de desempenho, além de resistente ao processo oxidativo. O Estreño-butadieno-Estireno (SBS), bastante usado em pavimentação nos Estados Unidos e Europa. Resulta um asfalto com uma vida útil bem superior se comparado ao material betuminoso convencional (Machado, 2007). De um modo geral, a classe dos polímeros é extensa o que explica as muitas pesquisas realizadas com esse tipo de produto.

Outra classe de destaque são os elastômeros tais como a borracha. A chamada BPM (borracha de pneu moído), tem se mostrado uma alternativa notória quanto à destinação dos subprodutos descartados de pneus de veículos automotores, contribuindo para a preservação do meio-ambiente. A borracha moída aditada a uma mistura betuminosa melhora consideravelmente a resistência do compósito ao envelhecimento, ou seja, tem-se um menor efeito oxidativo aumentando a vida útil do pavimento. O comportamento pseudoplástico acresce com a concentração de borracha na mistura (Santos, 2003).

Outro grupo de modificadores de compósitos asfálticos de grande relevância em pesquisas voltadas para a engenharia de infraestrutura de transportes rodoviários são as fibras. As provenientes do açaí da Amazônia, por exemplo, proporcionam ao produto final uma majorada resistência à tração e melhoria de desempenho mecânico quanto ao módulo de resiliência (Valença, 2011). Diversas outras fibras são pesquisadas por todo o mundo, dentre essas as oriundas da celulose que proporcionam estabilidade Marshall superiores às outras misturas convencionais (Dumke, 2005).

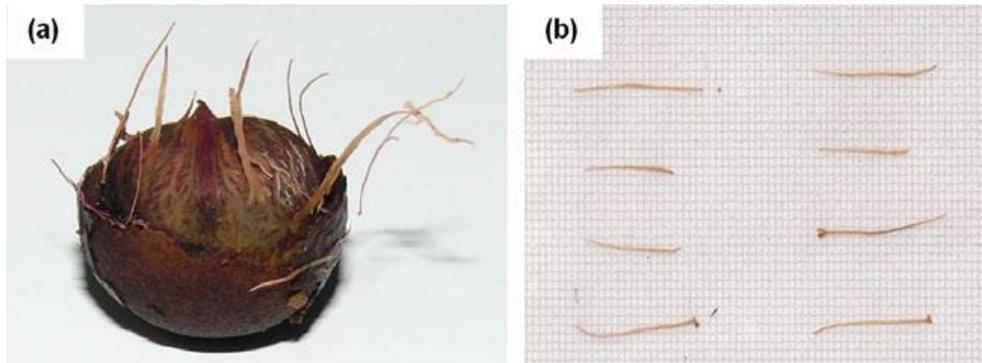


Figura 2.11 – a) Fruto do açaí. b) Fibra proveniente do açaí da Amazônia

Fonte: Valença, 2011

2.4.2 O carvão vegetal e o biochar

O carvão vegetal é um subproduto oriundo da carbonização da madeira, resultando em uma substância negra empregada em diversas áreas do conhecimento e da economia, tais como: na medicina, nas indústrias e comércios como combustível de lareiras, churrasqueiras, etc. Na Região Amazônica, subprodutos de carvão vegetal são produzidos de forma rotineira por meio de queimadas produzidas pela população rural, a qual visa à limpeza e eliminação de árvores nativas indesejadas em seus lotes de terra. Este material proveniente das queimadas pouco é reaproveitado pela população local, tornando-se um desafio de pesquisadores ante a sua destinação final de forma sustentável. Uma importante alternativa tecnológica é a sua aplicação como modificador de compósitos asfálticos, visando aperfeiçoamento nas propriedades físicas e mecânicas dos pavimentos flexíveis — objeto do presente estudo.



Figura 2.12 – Carvão vegetal

Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Carv%C3%A3o_vegetal

Na literatura tem-se vários estudos lançando mão de compósitos formados por solo argiloso e carvão vegetal, que ocasionaram melhorias estruturais, tais como: a minoração das propriedades expansivas e a plasticidade do material resultante, bem como o aumento de forma significativa do CBR da camada (Collantes, 2014).



Figura 2.13 – Argila vermelha e cinzas volantes de carvão usados em estabilização de bases
Fonte: Collantes, 2014

O biochar, por sua vez, define-se como material rico em carbono, proveniente da carbonização de biomassa sob baixa atmosfera de oxigênio, segundo o processo denominado pirólise (Maia, 2010). São exemplos de biomassa o bagaço de cana-de-açúcar, o babaçu, soja e a grama (switchgrass). A pirólise consiste na decomposição termoquímica da matéria ocasionada pela ação do calor. O biochar é a fração sólida resultante desse processo, sendo esse um carvão cujas propriedades (poder calorífico e o rendimento) dependem da biomassa que o originou.



Figura 2.14 – Biomassa de cana-de-açúcar
Fonte: Revista biomassa e energia, 2010

Tal material teve seu estudo originado na análise da chamada *terra preta de índio* (TPI), sendo esse um solo de excelente qualidade e muito utilizado pelos ribeirinhos na Região Amazônica (Falcão,2009). Do ponto de vista agrícola, o carvão oriundo de biomassa ao se misturar ao solo termina por condicioná-lo, aumentando consideravelmente o estoque e carbono do mesmo, bem como a capacidade de retenção hídrica favorecendo a produtividade. Na Figura 2.15 e 2.16 mostram-se o biochar comparado a outros tipos de carvão.

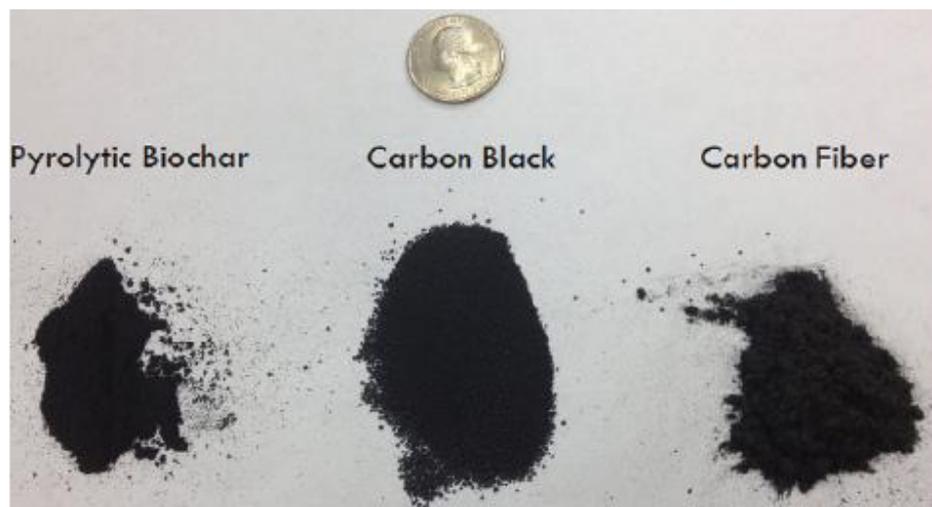


Figura 2.15 – Biochar, fibra de carbono e negro de fumo

Fonte: Zhao, 2014

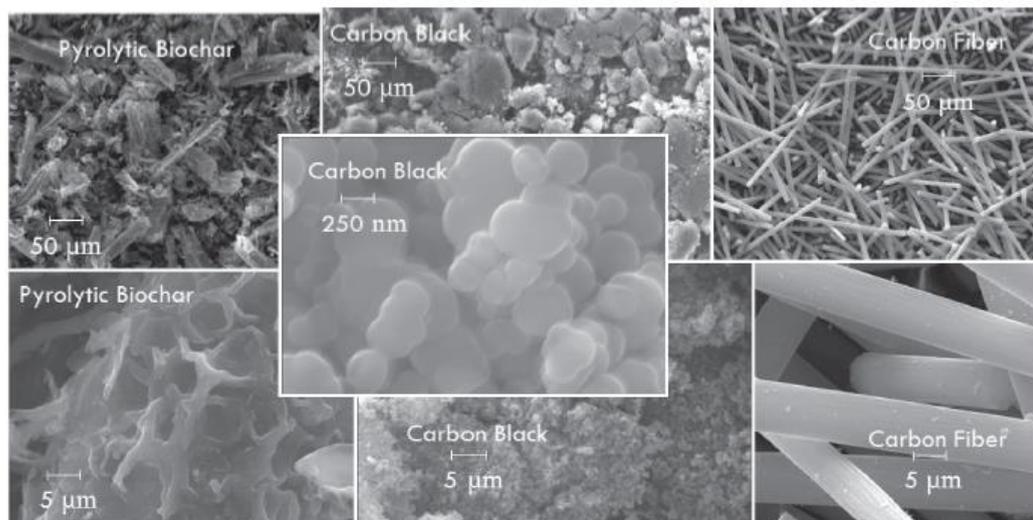


Figura 2.16 – Microscopia do biochar, fibra de carbono e negro de fumo

Fonte: Zhao, 2014

2.5 Fundamentação teórica

2.5.1 Desempenho mecânico por flexão a quatro pontos

O ensaio de flexão a quatro pontos consiste em submeter um corpo de prova, de formato prismático, a pulsos de cargas observando a resposta que os mesmos produzem em termos de deformação.

O equipamento utilizado nessa Dissertação permite o estudo de vigas, com comprimento médio da ordem de 40 cm, bi-apoiadas nas extremidades e que recebem duas cargas concentradas ao longo do vão, de modo a dividir a estrutura em três trechos, tendo cada uma extensão total equivalente a um terço da distância entre os apoios extremos (Figura 2.17). Tal geometria permite que a viga possua seu trecho central em flexão pura, ou seja, não há influência do esforço cortante (Figura 2.18).

Fazendo uma análise do ponto de vista elástico, e considerando o esquema estrutural proposto, pode-se calcular o módulo de elasticidade do material estudado conhecendo-se a sua flecha máxima, também conhecida como deflexão máxima.

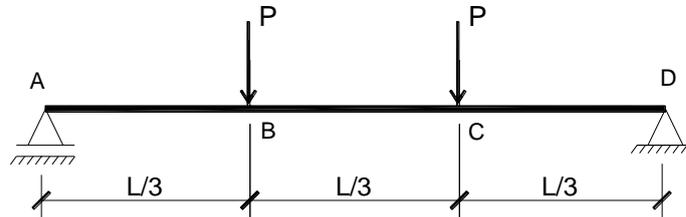


Figura 2.17 – Viga isostática proposta no teste de flexão a 4 pontos

Fonte: Autor, 2018

Como a carga total sobre a viga é da ordem de $2P$ e existe uma simetria de carregamento, por conseguinte, a reação nos apoios será igual a metade da carga total, ou seja, as reações serão da ordem de P (Figura 1.1). Para tal esquema estrutural o momento fletor nos apoios será igual a zero, pois estes são os extremos da viga. Já nos pontos B e C, o momento fletor será igual ao produto das reações pela distância entre os pontos A e B ou entre C e D.

$$M_B = R_A * \frac{L}{3} = \frac{PL}{3} \qquad M_C = R_D * \frac{L}{3} = \frac{PL}{3}$$

O diagrama de momento fletor da viga em questão, mostrado na Figura 2.18, considera-se L o vão da viga e P as cargas aplicadas no terço médio.

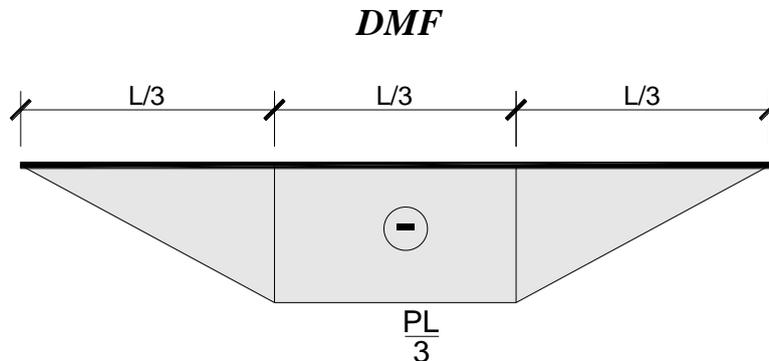


Figura 2.18 – Diagrama de momento fletor oriundo do teste de flexão a 4 pontos

Fonte: Autor, 2018

Tomando como base o método da Viga Conjugada para o cálculo de deslocamentos na flexão, tem-se uma nova viga com um novo carregamento igual ao DMF, contemplando ordenadas divididas por EI , onde E é o módulo de elasticidade do material e I o momento de inércia da área em relação a um eixo que passa pela linha neutra dos esforços.

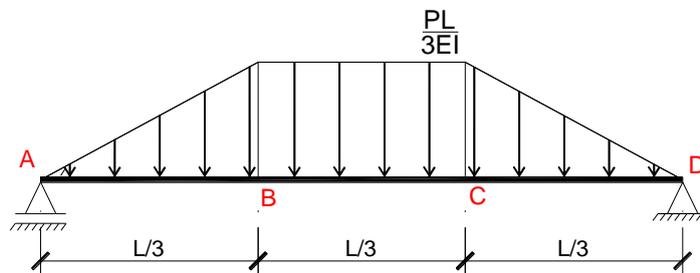


Figura 2.19 – Viga conjugada nas condições de cargas no teste de flexão a 4 pontos

Fonte: Autor, 2018

Após obtenção da conjugada da viga, basta calcular o momento fletor no meio do vão, o resultado será a flecha máxima na flexão. Para tal, do esquema de cargas da Figura 2.17 se obtém três figuras, um retângulo e dois triângulos, cada um terá uma resultante:

- Resultante do carregamento retangular (uniformemente distribuído)

$$R = \frac{L}{3} * \frac{PL}{3EI} = \frac{PL^2}{9EI} \quad (2.1)$$

- Resultante do carregamento triangular

$$T = \frac{1}{2} * \left(\frac{L}{3} * \frac{PL}{3EI} \right) = \frac{PL^2}{18EI} \quad (2.2)$$

- Cálculo da reação no apoio A:

$$R_A = T + \frac{R}{2} = \frac{PL^2}{18EI} + \frac{1}{2} * \frac{PL^2}{9EI} = \frac{PL^2}{9EI} \quad (2.3)$$

- Cálculo da flecha máxima no meio da viga:

$$\begin{aligned} Y &= R_A * \frac{L}{2} - T * \frac{5L}{18} - \frac{R}{2} * \frac{L}{12} = \frac{PL^2}{9EI} * \frac{L}{2} - \frac{PL^2}{18EI} * \frac{5L}{18} - \frac{PL^2}{18EI} * \frac{L}{12} \\ &= \frac{PL^3}{18EI} - \frac{5PL^3}{324EI} - \frac{PL^3}{216EI} = \frac{23PL^3}{648EI} \end{aligned} \quad (2.4)$$

- Cálculo do módulo de elasticidade:

$$E = \frac{23PL^3}{648IY} \quad (2.5)$$

Se a análise do ensaio fosse apenas elástica e para um sólido perfeito, a expressão 2.5 exprimiria a rigidez da peça. No entanto, no experimento de flexão a quatro pontos as cargas centrais não são aplicadas de forma permanente, pois a ideia é tentar simular trechos de um pavimento quando submetido às cargas provenientes dos pneus dos veículos. Tais solicitações ocorrem de forma repetitiva, ou seja, existe uma frequência na aplicação prática dessas cargas. O equipamento usado nesse estudo visa simular o comportamento mecânico e, portanto, o desempenho de uma via pavimentada, onde são aplicados pulsos de cargas a uma determinada frequência que geram pulsos de deformação correspondentes (Figura 2.20).

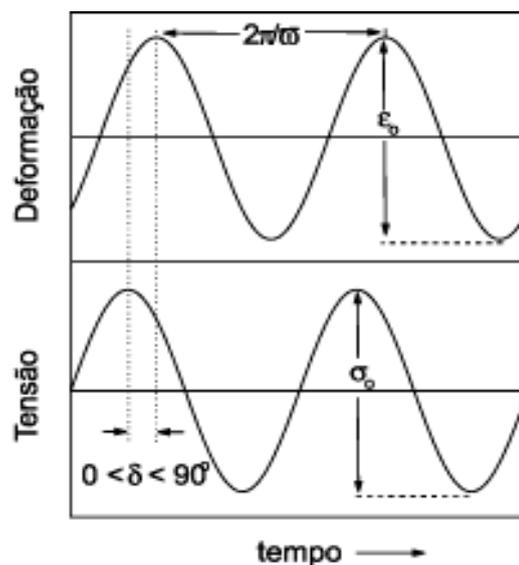


Figura 2.20 – Pulso de tensão e correspondente pulso de deformação

Fonte: Cassu, 2005

No ensaio, as cargas são aplicadas a determinadas frequências, tendo-se para cada carga uma resposta em termos de deformação. Assim, tanto as tensões aplicadas como as deformações equivalentes são do tipo senoidal. A distância entre os picos da senoide corresponde ao período T do movimento ondulatório. Sabendo que a pulsação é dada por $\omega = 2\pi f$ e $T = \frac{1}{f}$, logo, tem-se que o período é igual a:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (2.6)$$

Pode-se ainda observar na Figura 2.20 os parâmetros ε_0 , σ_0 e δ , sendo esses, respectivamente, a amplitude de deformação, a amplitude de tensão e o ângulo de fase (com valores que variam de 0 a 90°).

A questão é que os materiais empregados na construção de pavimentos flexíveis não são sólidos puros, ou seja, a elasticidade não é sua única característica, possuem também propriedades que são comumente atribuídas aos fluídos, tal como a viscosidade.

Deste modo, é conclusivo que os referidos materiais possuem características visco-elásticas, com propriedades elásticas e viscosas em maior ou menor proporção. O parâmetro técnico que mede o quão elástico e viscoso um material pode ser é o chamado **ângulo de fase**, sendo esse a defasagem existente entre os picos dos gráficos senoidais de tensão e de deformação. Quanto mais propriedades elásticas um compósito possui, mais o ângulo de fase tende a 0°, mostrando os picos de tensão e deformação próximos. Por outro lado, quando esse parâmetro se situa mais contíguo a 90°, sugere que a formulação possui características que mais se aproximam de um material viscoso. Sólidos perfeitos com ângulo de fase igual a 0° são chamados Hookenos, ao passo que fluidos perfeitos com ângulo de fase igual a 90° são denominados Newtonianos.

As formulações matemáticas que permitem expressar a tensão aplicada no experimento e a deformação equivalente são provenientes do campo de estudo do MHS (Movimento Harmônico Simples), caracterizando a ondulatória aplicada. Desse modo, tensão e deformação podem ser expressas respectivamente por:

$$\sigma(t) = \sigma_0 * \text{sen}(\omega t) \quad (2.7)$$

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 * \text{sen}(\omega t + \delta) \quad (2.8)$$

Combinando as equações 2.7 e 2.8 e considerando os princípios trigonométricos da soma de arcos tais como: $\text{sen}(A+B) = \text{sen}A \cdot \cos B + \text{sen}B \cdot \cos A$, define-se como **módulo complexo (E^*)** a rigidez característica do material viscoelástico da viga ensaiada, quando submetida à flexão pura. O módulo complexo por definição é expresso pela equação 2.9.

$$E^* = E' + iE'' \quad (2.9)$$

$$E' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} * \cos\delta \quad (2.10)$$

$$E'' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} * \text{sen}\delta \quad (2.11)$$

E' é característico da porção elástica, sendo esse chamado de módulo de armazenamento ou módulo elástico, elucidando a capacidade que o compósito tem de armazenar energia. Já o E'' é pertinente à porção viscosa, sendo esse denominado módulo de perda ou módulo viscoso, explicando a capacidade que a formulação tem de perder energia. É notório, também, que a equação 2.9 é representada por um número complexo, podendo o comportamento viscoelástico de um material ser expresso graficamente conforme mostrado na Figura 2.21.

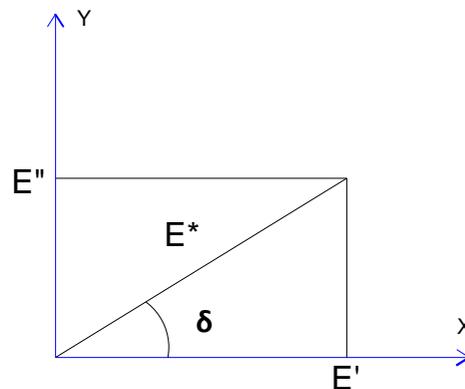


Figura 2.21 – Esquema gráfico do módulo complexo

Fonte: Autor, 2018

Dessa forma, o módulo de perda pertence ao eixo imaginário do gráfico e o módulo de armazenamento pertence ao eixo real, bem como, o ângulo de fase pode ser determinado pela equação 2.12.

$$\text{tg}\delta = \frac{E''}{E'} \quad (2.12)$$

CAPÍTULO 3

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais utilizados

Os materiais partícipes da pesquisa (brita 0, brita 1, pó de pedra, e cimento asfáltico de petróleo), formadores da composição asfáltica do tipo concreto asfáltico (CA), foram doados ao Grupo de Pesquisa em Geotecnia (GEOTEC) pela Construtora e Pavimentação LTDA (ARDO).

3.1.1 Brita

A brita, tipo granítica, fará parte das misturas asfálticas nas seguintes graduações: brita 0 (4,8 mm a 9,5 mm), brita 1 (9,5 mm a 19 mm) e como pó de pedra (menor que 4,8 mm). Os agregados graúdos, ou seja, a brita 0 e a brita, serão caracterizados por meio da granulometria (ABNT 7217, Agregados - Determinação da composição granulométrica), massa específica real (G_{sa}), massa específica aparente (G_{sb}), massa específica superfície saturada seca (G_{sbssd}) e quanto à absorção, conforme preconizado pela norma norte americana ASTM C-127 (Standard Test Method for Relative Density, Specific Gravity, and Absorption of Coarse Aggregate). No caso do pó de pedra, este tomará parte na formulação na condição de fíler.



Figura 3.1 – Brita granítica mediante sua granulometria

Fonte: <http://blog.construir.arq.br/tipos-de-brita-e-funcao/> (Adaptado)

3.1.2 Areia e Cimento asfáltico de petróleo

A areia, agregado miúdo, é do tipo média, com grãos que variam entre 0,6 e 2,4mm. Será analisada quanto a granulometria pela ABNT 7217 (Agregados - Determinação da composição granulométrica), massa específica real (G_{sa}), massa específica aparente (G_{sb}) e absorção segundo ASTM C-128 (Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate). Concernente ao ligante betuminoso, ter-se-á o cimento asfáltico de petróleo (CAP), comercializado pela refinaria de petróleo Isaac Sabbá (Reman), localizada no Município de Manaus (AM).



Figura 3.2 – Areia média típica

Fonte: <https://www.mineracaomg.com.br/clientes>



Figura 3.3 – Cimento Asfáltico de Petróleo

Fonte: Autor, 2018

3.1.3 Solo

A formulação com o solo, fundamentou-se em uma composição estabilizada granulometricamente. Visou apresentar uma alternativa a construção de uma subcamada, do tipo base, de um pavimento. Escolheu-se como material o solo argiloso, superficial e característico do perfil geotécnico da cidade de Manaus/AM, proveniente de uma jazida localizada no Bairro Nova Cidade, trecho da Avenida das Flores próximo à Av. Margarita (Figura 3.4).

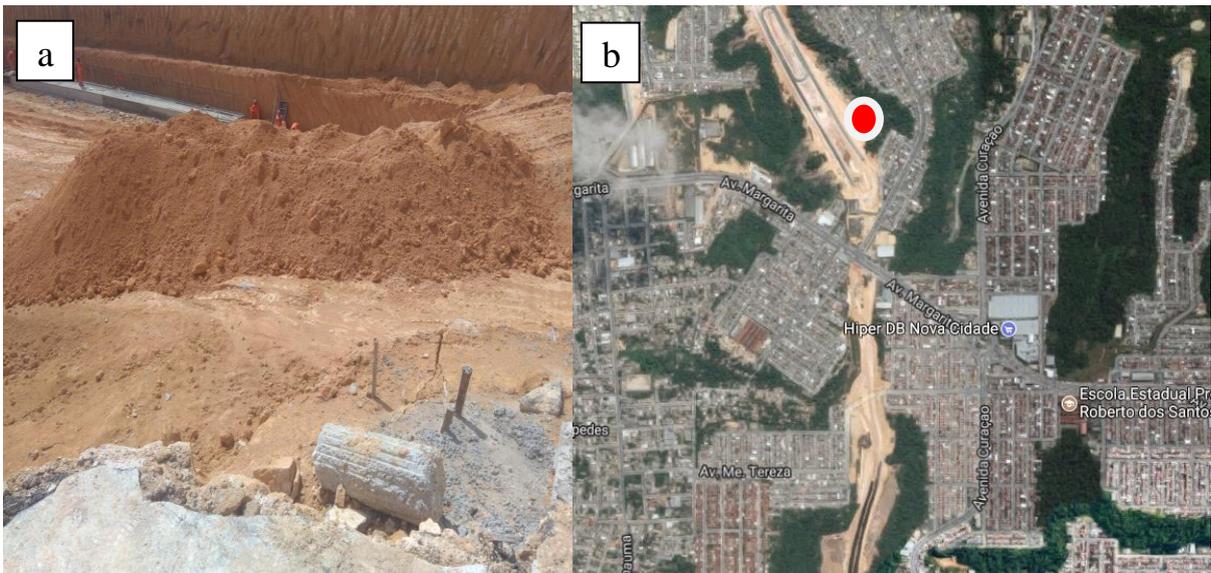


Figura 3.4 – a) Solo; b) Localização da jazida

Fonte: Autor, 2018

Examinou-se o solo de acordo com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Em particular, quanto à consistência, obtiveram-se o limite de liquidez (LL) e o limite de plasticidade (LP), conforme métodos de ensaio da NBR 7180 e NBR 6459, respectivamente. A determinação da massa específica e a granulometria seguiram as normas NBR 6508 (massa específica real de grãos) e NBR 7181 (análise granulométrica), respectivamente. No tocante aos parâmetros de compactação, peso específico aparente seco máximo e a umidade ótima, calcularam-se pelo método de ensaio Proctor modificado, de acordo com a NBR 7182 (Ensaio de compactação). Na realização desse experimento para: solo natural, solo natural com 10% em massa de carvão vegetal e solo natural com 10% em massa de biochar, e em cada caso, encontrou-se previamente a umidade higroscópica, parâmetro necessário no cálculo do acréscimo de água para a consecução dos cinco pontos de ensaio, três no ramo seco e dois no ramo úmido.

3.1.5 Biochar e Carvão vegetal

O biochar será aditado tanto em compósitos com solo, como nas misturas asfálticas do tipo concreto asfáltico (CA). Fornecido pelo Prof. Dr. Newton Falcão responsável pelo Laboratório de Celulose e Carvão Vegetal da Coordenação de Produtos Florestais do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA. O material em questão originou-se da pirólise do ouriço de castanha do Brasil, uma biomassa fresca proveniente da safra 2013/2014 da fazenda Aruanã, no Município de Itacoatiara/AM. O equipamento utilizado nesse processo de biocarbonização é um forno de tijolo refratário com capacidade para 20kg. Carbonizou-se a biomassa até alcançar a temperatura de 500°C, ficando nesta condição por 2h até o desligamento do aparelho e resfriamento do material. Na Figura 3.5 tem-se a imagem desse material a ser usado nos experimentos.

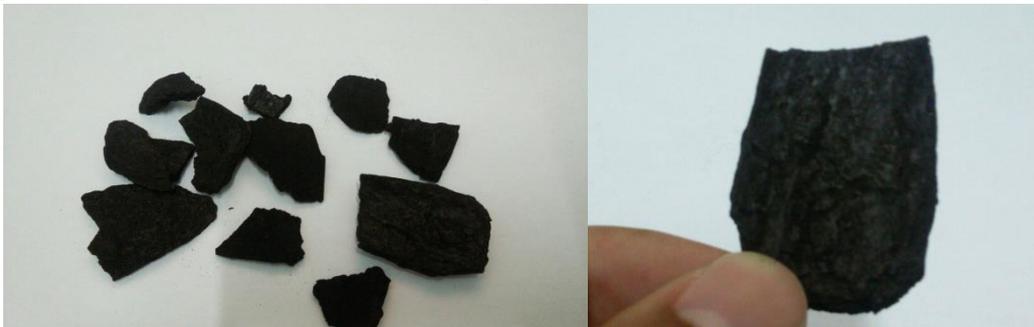


Figura 3.5 – Biochar oriundo de biomassa típica da região amazônica

Fonte: Autor, 2018

O carvão vegetal é proveniente de fornos de carvoejamento (rabo-quente) por meio de produtores locais da estrada de Balbina, localizada no Município de Presidente Figueiredo/AM. Em particular, origina-se da queima (com temperaturas que variam de 300 a 400°C) de espécies vegetais nativas da região Amazônica, tais como imbaúba, pau de lacre, etc.



Figura 3.6 – Carvão vegetal típico da Região Amazônica

Fonte: Autor, 2018

O carvão vegetal e o biochar foram moídos por meio de um apiloador manual, sendo em seguida passados na peneira com abertura de 2mm e armazenados em baldes fechados para que não se ter perda de massa, visto serem altamente voláteis.

3.2 Dosagem

3.2.1 Solo-carvão e solo-biochar

Para o estudo das subcamadas, estudaram-se os compósitos formados pela mistura do solo argiloso típico da cidade de Manaus aditivado com o biochar e o carvão vegetal. Tais formulações realizar-se-ão segundo dois tipos, ou seja, solo-carvão e solo-biochar, tal como indica a Tabela 3.1.

DESTINAÇÃO	AMOSTRA	MATERIAL	MODIFICADOR	TEOR	TEMPERATURA
SUBCAMADAS	SN 01	SOLO ARGILOSO	--	--	25C
	SN 02	SOLO ARGILOSO	--	--	25C
	SCV 03	SOLO ARGILOSO	CARVÃO VEGETAL	10%	25C
	SCV 04	SOLO ARGILOSO	CARVÃO VEGETAL	10%	25C
	SBC 05	SOLO ARGILOSO	BIOCHAR	10%	25C
	SBC 06	SOLO ARGILOSO	BIOCHAR	10%	25C

Tabela 3.1 – Compósitos para subcamadas com solo + modificador

Fonte: Autor, 2018

Num primeiro momento, determinaram-se os parâmetros de compactação para o solo natural e para os compósitos solo-biochar e solo-carvão. Em seguida, confeccionaram-se corpos de provas segundo cada teor de material indicado na Tabela 3.1. Moldaram-se tais amostras em forma de viga prismática, empregando uma prensa. Na sequência, esses corpos de prova foram inseridos no aparelho “a quatro pontos”, com vistas à análise do comportamento mecânico à flexão.

3.2.2 Composições asfálticas

Obtiveram-se as misturas asfálticas do tipo CA/CBUQ com os seguintes partícipes: CAP 50/70 (ligante betuminoso), brita 1 e brita 0 (agregados graúdos), areia (agregado miúdo), pó de pedra (fíler), e modificadores (biochar e carvão vegetal). Assim, como no caso das formulações com solo argiloso (item 3.2.1), testaram-se os compósitos betuminosos inserindo-se o carvão vegetal e o biochar separadamente, obedecendo as proporções apresentadas na Tabela 3.2. Após a confecção dos corpos de prova provenientes dessas composições, determinou-se o comportamento mecânico pelo ensaio de flexão a

quatro pontos.

Compósitos para revestimento asfáltico							
Amostra	Brita 0	Brita 1	Pó de pedra	Areia média	CAP 50/70	Modificador	Teor de modificador
CA 01	28,2%	14,8%	28,2%	23,8%	5%	–	–
CA 02	28,2%	14,8%	28,2%	23,8%	5%	–	–
CACV 03	28,2%	14,8%	28,2%	23,8%	5%	Biochar	3%
CACV 04	28,2%	14,8%	28,2%	23,8%	5%	Biochar	3%
CABC 05	28,2%	14,8%	28,2%	23,8%	5%	Carvão	3%
CABC 06	28,2%	14,8%	28,2%	23,8%	5%	Carvão	3%

Tabela 3.2 – Compósitos para revestimento asfáltico com CA + modificador

Fonte: Autor, 2018

3.3 Comportamento mecânico

3.3.1 Ensaio de flexão a 4 pontos em vigas

As misturas asfálticas e os compósitos formados pelo solo argiloso, ambos com a presença dos aditivos (biochar e carvão vegetal), nas proporções mostradas anteriormente, ensaiaram-se na Four Point Bending Apparatus da IPC global (Figura 3.7). Equipamento este, pertencente ao Grupo de pesquisa em Geotecnia (GEOTEC), que simula a flexão sobre um corpo de prova em forma prismática, tal como uma viga em um sistema construtivo. Tal experimento se caracteriza por submeter uma viga (solo-aditivos ou mistura asfáltica com a participação dos aditivos) a duas cargas centrais de mesma intensidade, ao passo que essa está apoiada nas extremidades, culminando na chamada flexão a 4 pontos.

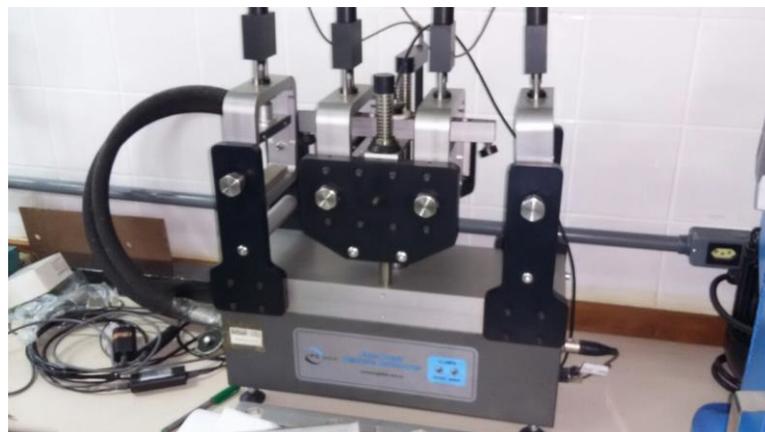


Figura 3.7 – Máquina para ensaio de flexão a 4 pontos

Fonte: Autor, 2018

Ressalta-se que, a formulação teórica, mostrando um sistema estrutural moldado dessa forma, resulta em uma flexão pura no trecho central da viga, entre os pontos de aplicação das cargas. Portanto, não há atuação de esforço cisalhante no referido trecho, apenas a existência de momento fletor. Na Figura 3.8 apresenta-se uma diagramação do mencionado sistema.

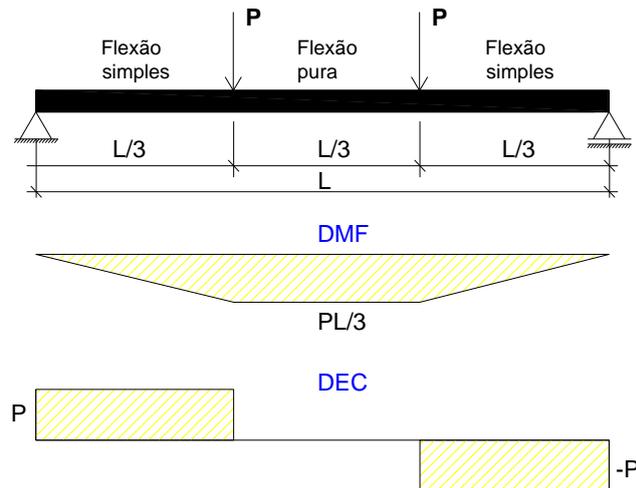


Figura 3.8 – Sistema estrutural característico da flexão a 4 pontos

Fonte: Autor, 2018

Os corpos de prova, como mencionado anteriormente, são vigas formadas por solo-biochar e solo-carvão ou concreto asfáltico com a presença dos aditivos (biochar e carvão). Foram compactadas em um molde metálico específico, robusto e desmontável, o qual permitiu a confecção de formas prismáticas (Figura 3.9). A moldagem dos CP's foi possível com o auxílio de uma prensa hidráulica manual P3000 da Bovenau, com capacidade de 30 toneladas (Figura 3.10). As amostras foram inseridas nessa prensa e comprimidos até atingir a altura pré-estabelecida para o ensaio, calculada de acordo com os parâmetros de compactação determinados. No que tange às vigas de CA, separou-se todos os agregados em recipientes plásticos, misturando-os na proporção exata. Em seguida, o material foi aquecido a uma temperatura da ordem de $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ e misturado ao CAP, sendo na sequência adicionados os agregados e aditivos. Com o auxílio de luvas, a composição foi levada ao molde, untado com óleo, a qual foi compactada até altura pré-definida.

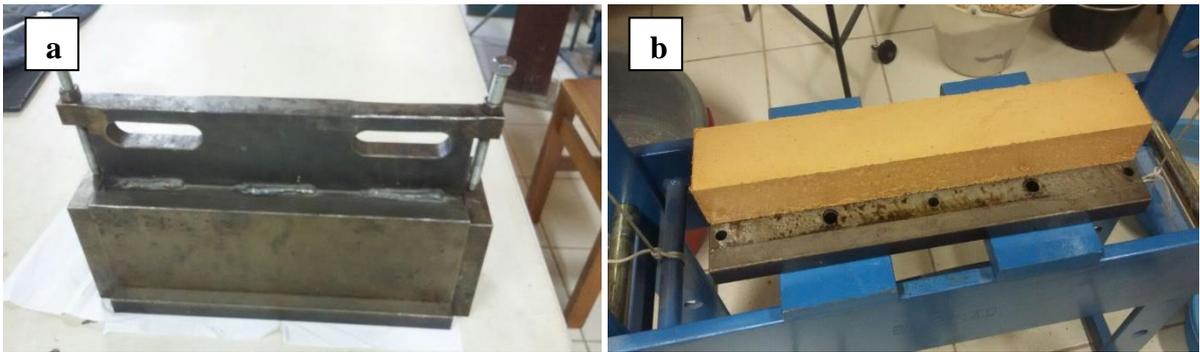


Figura 3.9 – a) Forma para CP's; b) CP moldado

Fonte: Autor, 2018



Figura 3.10 – Prensa para moldagem de corpo de prova prismático

Fonte: Autor, 2018

CAPÍTULO 4

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 Caracterização Física – solo e composições

Determinaram-se, com repetição, os limites de Atteberg, as massas específicas dos grãos, e os parâmetros de compactação em conformidade com as prescrições de normas.

4.1.1 Solo - Limites de Atteberg, massa específica dos sólidos, granulometria e classificações

Os resultados dos ensaios de limite de liquidez, visualizado na Figura 4.1, e limite de plasticidade apresentaram valores médios iguais a 84,00% e 42,50%, respectivamente. Tais valores classificaram o solo como de plasticidade muito alta, com IP igual 41,5, conforme DAS (2014). Alusivo a massa específica dos grãos do solo ou densidade real, obteve-se valor médio de $2,20 \text{ g/cm}^3$. No caso da granulometria, tem-se o seu resultado exibido na Figura 4.2, em que se verifica a textura de argila. Destaca-se que as cores azul, roxo e vermelho são provenientes, respectivamente, do peneiramento grosso, fino e teste de sedimentação. Reunindo os dados da plasticidade e textura tipifica-se o material “in natura” como argila inorgânica de alta plasticidade – CH, segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), ou ainda, solo argiloso A-7-5, pela classificação HRB (Das, 2014).

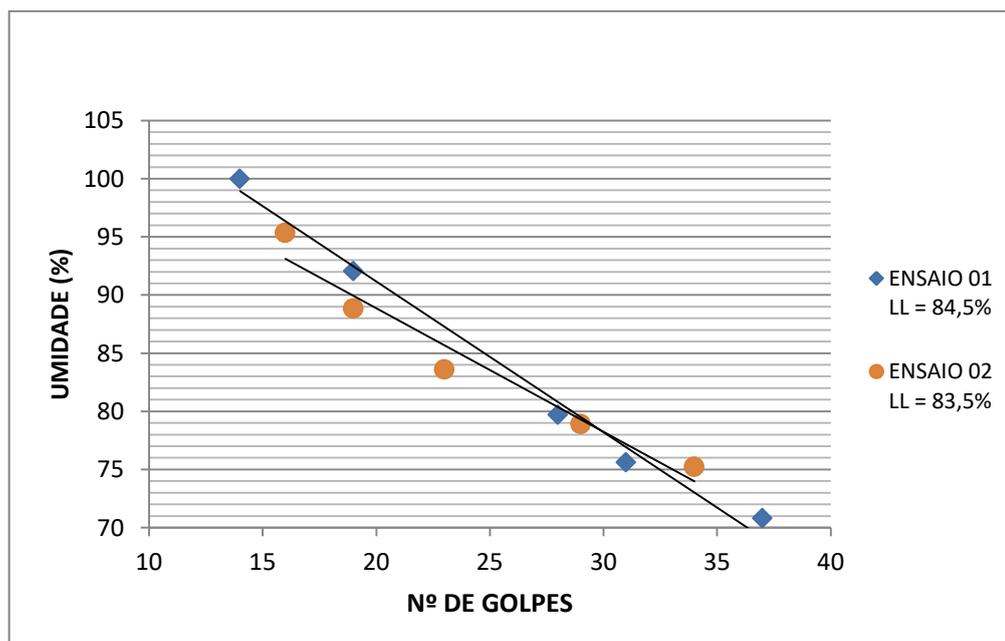


Figura 4.1 – Limite de liquidez (LL) do solo natural.

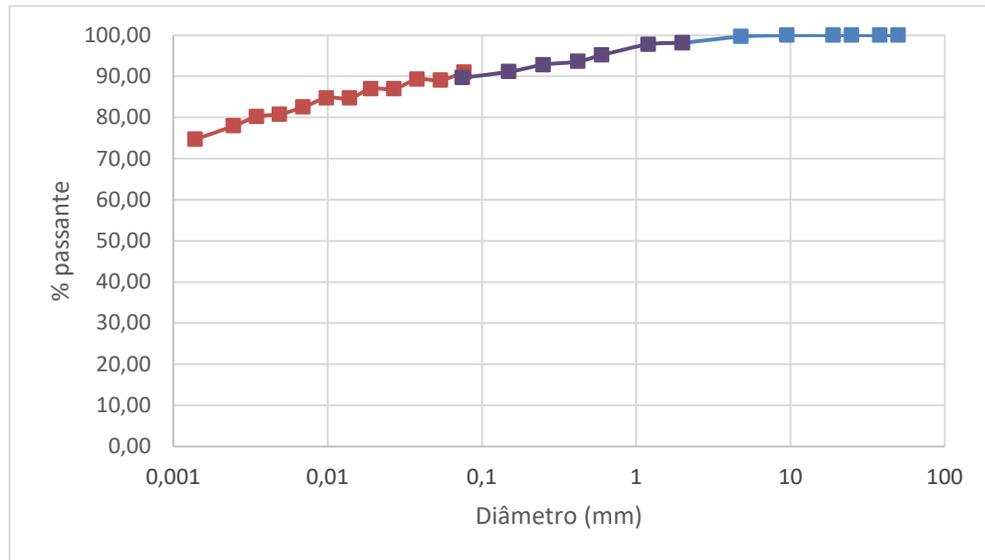


Figura 4.2 – Curva granulométrica do solo natural

4.1.2 Solo e Composições - Compactação

Fundamentado no ensaio de compactação e segundo a energia modificada, tem-se os parâmetros de compactação, ou seja, a umidade ótima ($w_{ót}$) e a massa específica aparente seca máxima ($\rho_{dmáx}$) para os três distintos compósitos: solo natural (SN), solo natural aditado com 10% em massa de carvão vegetal (SCV) e solo natural com 10% em massa de biochar (SBC).

Consoante a Figura 4.3, notou-se que para o material “in natura” (SN) a umidade ótima foi de 35,5% e sua massa específica seca máxima igual a $1,35\text{g/cm}^3$. Para os compósitos solo-carvão vegetal (SCV) e solo-biochar (SBC), encontraram-se os pares de valores umidade ótima e massa específica seca máxima iguais a 36,5%, $1,265\text{g/cm}^3$ e 39%, $1,241\text{g/cm}^3$, respectivamente. Assim sendo, observou-se aumento na umidade ótima da ordem de 2,82% (compósito SCV) e 9,86% (compósito SBC), bem como decréscimo na massa específica seca máxima de 6,30% (SCV) e 8,07% (SBC), possivelmente decorrente do carvão ser um material mais leve e, deste modo absorver mais água, culminando em uma maior $w_{ót}$.

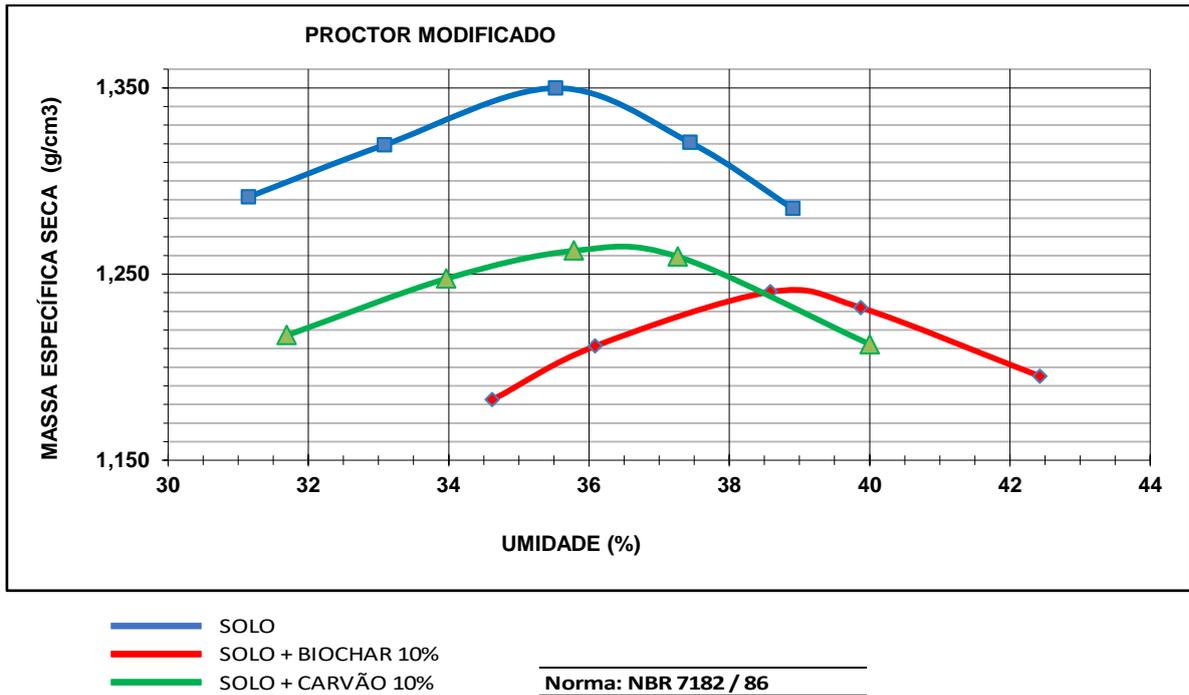


Figura 4.3 – Curvas de compactação

4.2 Caracterização Física – agregados e cimento asfáltico de petróleo

Os agregados (graúdo, miúdo e fíler) utilizados nas misturas asfálticas possuem densidade real constantes na Tabela 4.1. No que tange ao ligante betuminoso, igualmente participe do concreto asfáltico (CA), o mesmo seguiu os parâmetros preconizados pela Agência Nacional do Petróleo (ANP), conforme exhibe a Tabela 4.2. Tais resultados foram obtidos na Refinaria Isaac Sabbá (REMAN).

Material	Densidade real (g/cm ³)
Brita 1	2,632
Brita 0	2,613
Pó de pedra (fíler)	2,574
Areia	2,596

Tabela 4.1 – Densidade real dos agregados para CA

Características	Unidade	Limites				Métodos	
		CAP 30-45	CAP 50-70	CAP 85-100	CAP 150-200	ABNT	ASTM
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	30 a 45	50 a 70	85 a 100	150 a 200	NBR 6576	D 5
Ponto de amolecimento, (mínimo)	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D 36
Viscosidade Saybolt-furol	s					NBR 14950	E 102
a 135°C (mínimo)		192	141	110	80		
a 150°C (mínimo)		90	50	43	36		
a 177°C (mínimo)		40 a 150	30 a 150	15 a 60	15 a 60		
Viscosidade Brookfield	cP					NBR 15184	D 4402
a 135°C, SP 21, 20rpm (mínimo)		374	274	214	155		
a 150°C, SP 21 (mínimo)		203	112	97	81		
a 177°C, SP 21 (mínimo)		76 a 285	57 a 285	28 a 114	28 a 114		
Índice de susceptibilidade térmica		(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	-	-
Ponto de fulgor (mínimo)	°C	235	235	235	235	NBR 11341	D 92
Solubilidade em tricloroetileno (mínimo)	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042
Ductilidade a 25°C (mínimo)	Cm	60	60	100	100	NBR 6293	D 113

Tabela 4.2 – Especificações do cimento asfáltico de petróleo (CAP)

Fonte: ANP, 2005

4.3 Dosagem

Alusivo aos compósitos de solo, os corpos de provas foram moldados de acordo com os parâmetros de compactação determinados anteriormente, ou seja, nas vigas de solo e seus compósitos aditou-se água de modo a atingir a umidade ótima de compactação, e por conseguinte sua massa específica aparente seca máxima. Conhecendo o volume do molde, determinou-se a massa dos materiais participantes das misturas.

No que se refere às vigas de concreto asfáltico, essas foram dosadas conforme laudo fornecido pela construtora ARDO, visando estudar um CBUQ utilizado na pavimentação de vias em Manaus. A proporção dos agregados, os parâmetros técnicos desses e a sequência de dosagem dos corpos de prova foram reunidos nas Tabelas 4.3 e 4.4.

PREPARO DE CP'S DE SOLO PARA ENSAIO DE FLEXÃO A 4 PONTOS			
AMOSTRA	VIGA SOLO	VIGA SOLO + 10% BIOCHAR	VIGA SOLO + 10% CARVÃO
UMIDADE HIGROSCÓPICA (solo + aditivo)	5,42%	8,73%	3,39%
Massa específica seca máxima do compósito (g/cm ³)	1,350	1,241	1,265
MASSA DE ADITIVO ÚMIDO (g)		243,56	264,61

Tabela 4.3 – Dosagem de corpos de prova de solo

PREPARO DE AMOSTRAS DE CA PARA ENSAIO DE FLEXÃO A 4 PONTOS						
AMOSTRA	Materials					
VIGA CBUQ	Brita 1	Brita 0	Pó de pedra	Areia	CAP	Aditivo
% de materiais na mistura	14,80%	28,20%	28,20%	23,80%	5,00%	0,00%
Massa de agregados na mistura (g)	2.677,964					
Massa de materiais / viga (g)	417,20	794,93	794,93	670,90	140,95	
VIGA CBUQ + 3% CARVÃO	Brita 1	Brita 0	Pó de pedra	Areia	CAP	Aditivo
% de materiais na mistura	14,80%	28,20%	25,20%	23,80%	5,00%	3,00%
Massa de agregados na mistura (g)	2.618,169					
Massa de materiais / viga (g)	407,88	777,18	694,50	655,92	137,80	82,68
VIGA CBUQ + 3% BIOCHAR	Brita 1	Brita 0	Pó de pedra	Areia	CAP	Aditivo
% de materiais na mistura	14,80%	28,20%	25,20%	23,80%	5,00%	3,00%
Massa de agregados na mistura (g)	2.618,169					
Massa de materiais / viga (g)	407,88	777,18	694,50	655,92	137,80	82,68

Tabela 4.4 – Dosagem de corpos de prova de Concreto asfáltico

4.4 Moldagem dos corpos de prova

Visando a caracterização mecânica, produziram-se os corpos de prova de forma prismática, com o intuito de submetê-los a cargas transversais ao seu eixo, o que possibilitou encará-los como vigas isostáticas.

Respeitante as vigas de solo (Figura 4.4), verificou-se o grau de compactação, reunidos na Tabela 4.5, que apontam uma diminuição de 2,70% para o solo aditado com carvão vegetal e 2,37% para solo natural aditado com biochar.

DESTINAÇÃO	AMOSTRA	GC (%)
SUBCAMADAS	SN	101,15
	SCV	98,42
	SBC	98,75

Tabela 4.5 – Grau de compactação, vigas de solo.



Figura 4.4 – Vigas de solo natural

Alusivo as misturas asfálticas, igualmente, confeccionaram-se as vigas prismáticas, tendo sido determinado a massa e volume, calcularam-se, então, a massa específica aparente dessas amostras, expostos na Tabela 4.6. A terminologia CA é concernente às vigas de concreto asfáltico sem aditivos, CACV e CABC são os compósitos de concreto asfáltico com carvão vegetal e biochar, respectivamente. De posse desses dados, observou-se que as vigas CACV são discretamente menos densas, se comparado ao CA não aditado, com variação percentual de 0,78%, ao passo que, a referida variação é da ordem de 1,08% para as vigas CABC, ou seja, o compósito com biocarvão resultou em um corpo de prova mais leve atinente aos confeccionados com carvão vegetal.

DESTINAÇÃO	AMOSTRA	Massa específica (g/cm ³)
MISTURAS ASFÁLTICAS	CA	2,179
	CACV	2,162
	CABC	2,156

Tabela 4.6 – Massa específica das misturas asfálticas.

4.5 Flexão a quatro pontos

4.5.1 Vigas de solo

Em seguida a confecção das vigas de solo, essas foram avaliadas pelo ensaio de flexão a quatro pontos, caracterizando o comportamento mecânicos desses materiais empregados em subcamadas dos pavimentos. A Tabela 4.7 dispõe as condições e teores pré-estabelecidos de tais corpos de provas. No total moldaram-se seis vigas para ensaio de flexão, sendo duas para o solo natural (SN), duas referentes ao compósito solo-carvão vegetal (SCV) e duas vigas destinadas à formulação solo-biochar (SBC) (Figura 4.5). Destaca-se nas Figuras 4.6 e 4.7, respectivamente, as vigas do material argiloso (SN) e da mistura solo-carvão vegetal (SCV) posicionadas no equipamento para realização do teste de flexão a 4 pontos.

CORPOS DE PROVAS PARA ENSAIO DE FLEXÃO A 4 PONTOS					
DESTINAÇÃO	AMOSTRA	MATERIAL	MODIFICADOR	TEOR	TEMPERATURA
SUBCAMADAS	SN 01	SOLO ARGILOSO	--	--	25C
	SN 02	SOLO ARGILOSO	--	--	25C
	SCV 03	SOLO ARGILOSO	CARVÃO VEGETAL	10%	25C
	SCV 04	SOLO ARGILOSO	CARVÃO VEGETAL	10%	25C
	SBC 05	SOLO ARGILOSO	BIOCHAR	10%	25C
	SBC 06	SOLO ARGILOSO	BIOCHAR	10%	25C

Tabela 4.7 – Corpos de prova de solo natural (SN) e compósitos (SCV e SBC)



Figura 4.5 – Vigas de solo para ensaio de flexão a 4 pontos

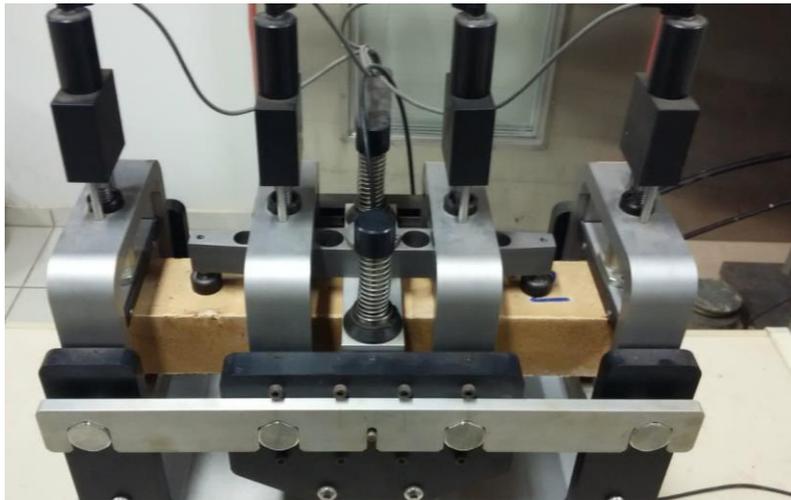


Figura 4.6 – Viga de solo natural (SN) no equipamento de flexão a 4 pontos

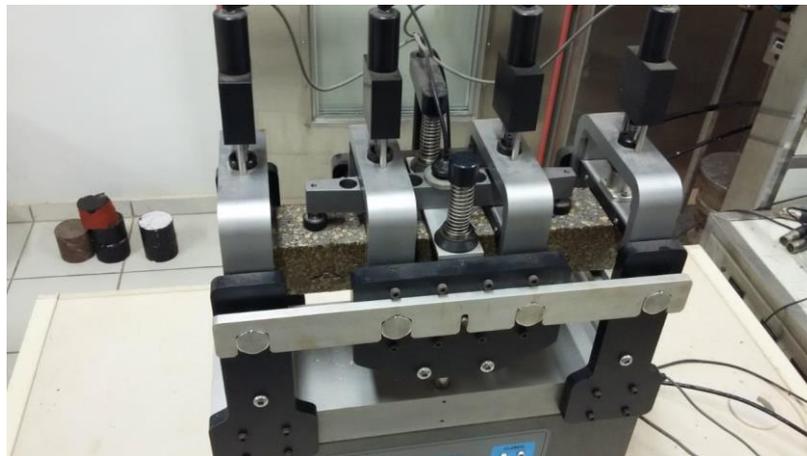


Figura 4.7 – Viga de solo-carvão vegetal (SCV) no equipamento de flexão a 4 pontos

Atinente ao comportamento mecânico, tem-se, inicialmente, na Figura 4.8 o resultado apresentado pelo solo “in natura” (SN) das tensões e deformações em função do tempo. Nota-se um desempenho que mais se aproximam de um material elástico, ou “hookeno”, visto que o pulso de tensão gerou uma similar resposta de deformação senoidal. Observando-se, assim, que as propriedades “viscosas” do solo natural (SN) pouco interferem no desempenho mecânico global do material. Constata-se que tais características também se repetem para as vigas com a participação dos aditivos (SCV e SBC), tal como evidenciam as Figuras 4.9 e 4.10. Sublinha-se, igualmente, que o gráfico da força, para o solo natural (SN), possui um pico máximo e um mínimo em torno de 0,1kN enquanto que tal pico cai para aproximadamente -0,02KN no compósito solo-carvão e para 0,04KN no compósito solo-biochar. No caso dos deslocamentos tem-se, por sua vez, pico máximo próximo de 0 para o solo “in natura” (SN) e igual a 0,01mm para as formulações (SCV e SBC).

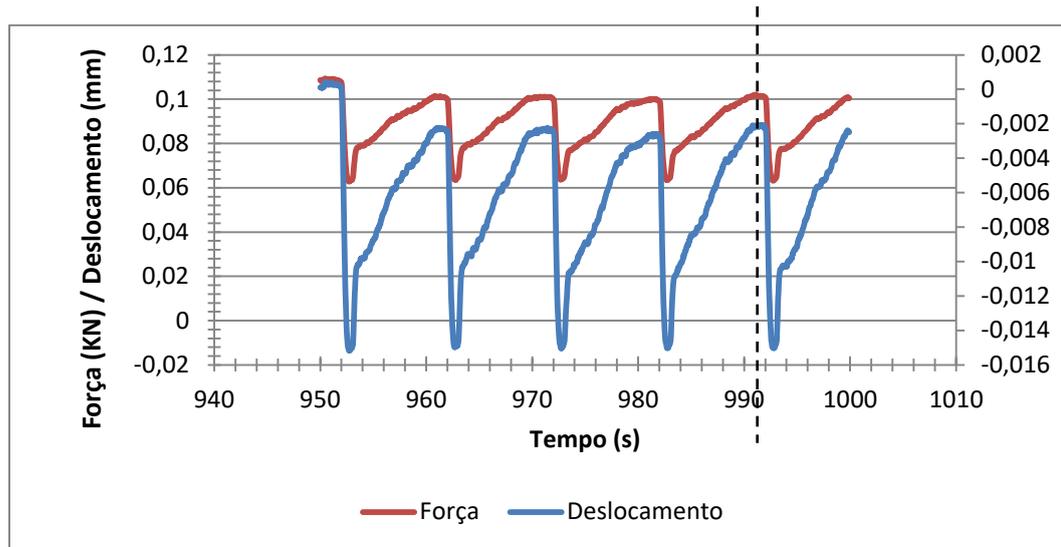


Figura 4.8 – Força e deslocamento em função do tempo, viga SN

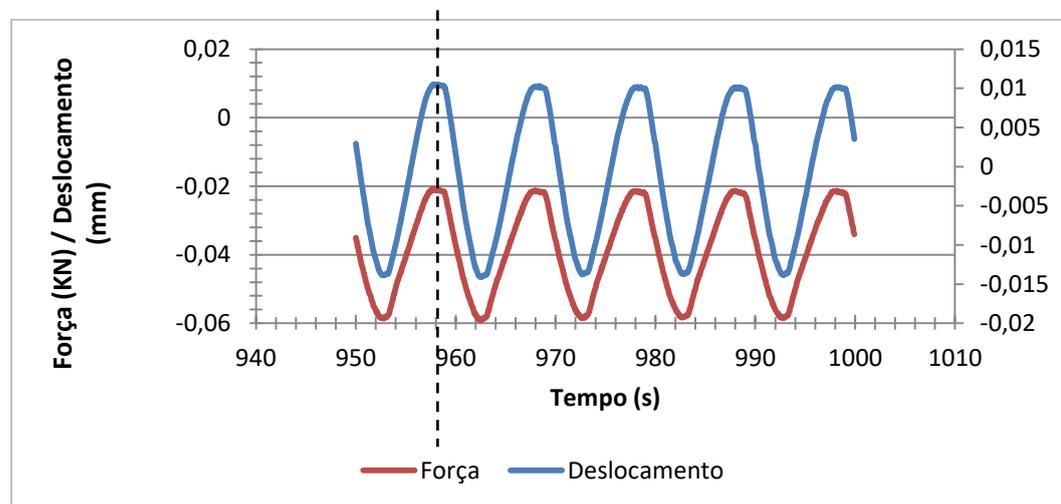


Figura 4.9 – Força e deslocamento em função do tempo, viga SCV

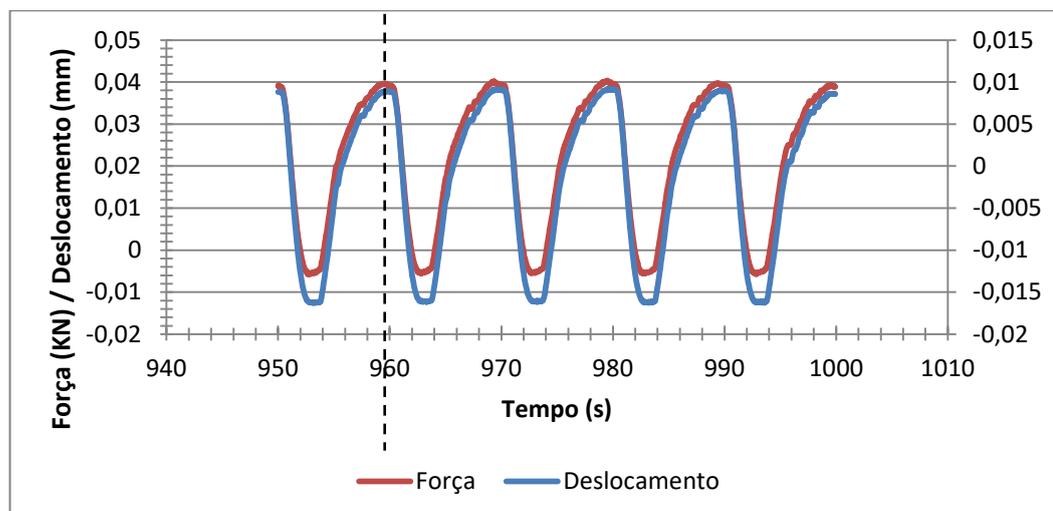


Figura 4.10 – Força e deslocamento em função do tempo, viga SBC

Nas indicadas Figuras 4.8, 4.9 e 4.10, pode-se igualmente verificar que os picos de força e do deslocamento das senoides são muito próximos, quase alinhados, demonstrando que o ângulo de fase se situa em torno de zero, remontando a ideia que o material solo e suas composições tem um comportamento mecânico que se assemelha aquele revelado por materiais não viscosos. Deve ser frisado que o ângulo de fase define o quão elástico ou viscoso um material pode ser. Os resultados, reunidos na Figura 4.11, explicitam para as vigas de solo (SN), quanto maior a frequência maior o valor desse parâmetro, como se nota nos intervalos de 10Hz e 20Hz. No que tange aos compósitos confeccionados com carvão vegetal (SCV), estes exprimem um comportamento ligeiramente mais “viscoso” se comparado às formulações com o biochar (SBC), visto que o ângulo de fase das vigas de solo-carvão vegetal (SCV) é, em média, superior aquele obtido nas amostras com o solo natural e tendo a participação do biocarvão (SBC). Registra-se, além disso, que as misturas com carvão vegetal (SCV) apontam acréscimo percentual, em relação ao solo argiloso (SN), para as frequências de 5Hz e 20Hz da ordem de 76,92% e 9,09%, respectivamente. No caso das formulações com o biochar (SBC) e de acordo com o mesmo intervalo de frequências, tem-se um aumento percentual respeitante ao solo “in natura” (SN) no intervalo de 46,15% a 4,55%. Em particular, na frequência de 10Hz houve um decréscimo de 20,67% (SCV) e 51,96% (SBC) frente a viga obtida com solo natural (SN).

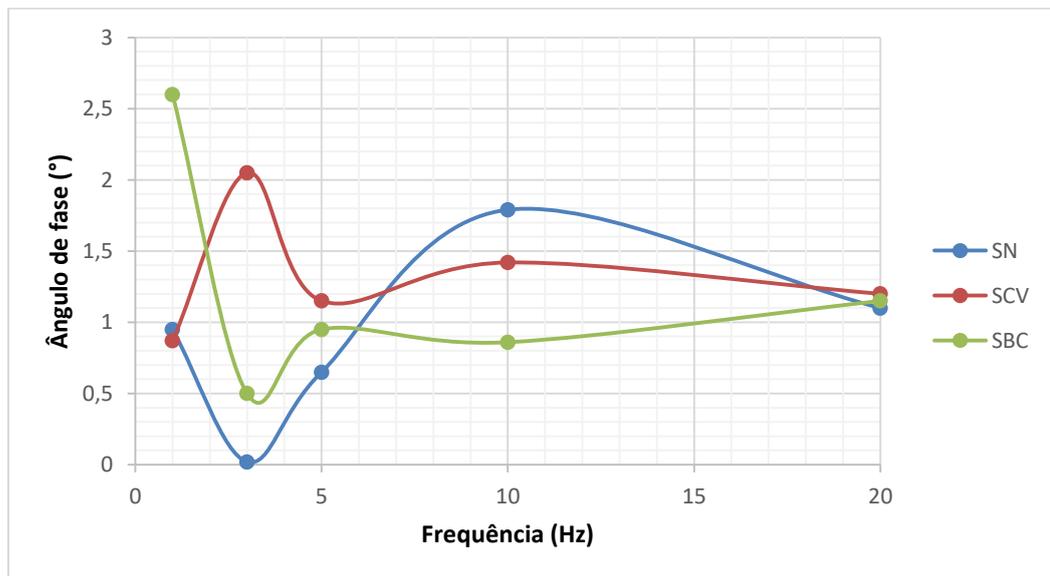


Figura 4.11 – Ângulo de fase, vigas SN, SCV e SBC

Outra análise efetuada nessa Dissertação é concernente ao módulo complexo, característico dos materiais visco-elásticos, que mede a rigidez do material. Considerando os dados alusivos para cada corpo de prova ensaiado, esboçou-se o gráfico exibido na Figura

4.12 para melhor visualização e comparação para cada frequência ensaiada. Assinala-se que o mesmo registra valores inferiores do compósito SCV cotejado ao solo argiloso (SN), nas frequências de 1Hz, 3Hz, 5Hz e 10Hz, com quedas percentuais respectivamente de 19,93%, 15,32%, 18,13% e 5,29%. Porém, na frequência de 20Hz anotou-se um aumento percentual da ordem de 6,60%. Concernente à formulação SBC, esta demonstrou maiores valores frente ao solo “in natura” (SN), ou seja, é conclusivo que a inserção do biocarvão majora as propriedades de rigidez. Para as frequências de 3Hz, 5Hz, 10Hz e 20Hz assinalou-se um acréscimo percentual, respectivamente, de 3,14%, 1,45%, 8,03% e 10,4%. Exclusivamente na frequência de 1Hz houve um decréscimo da ordem de 1,40%.

Salienta-se, também, o comportamento oscilatório dos gráficos expostos na Figura 4.12. Pertinente aos corpos de prova SN e composição SBC, estes mostraram uma ligeira queda nos no módulo complexo alusivo as frequências de 3Hz e 10Hz, e aumento nas parciais de 5Hz e 20Hz. Consoante a mistura SCV, demonstrou um oposto desempenho, isto é, verificou-se uma ligeira queda na frequência de 5Hz e acréscimo nas frequências de 3Hz, 10Hz e 20Hz.

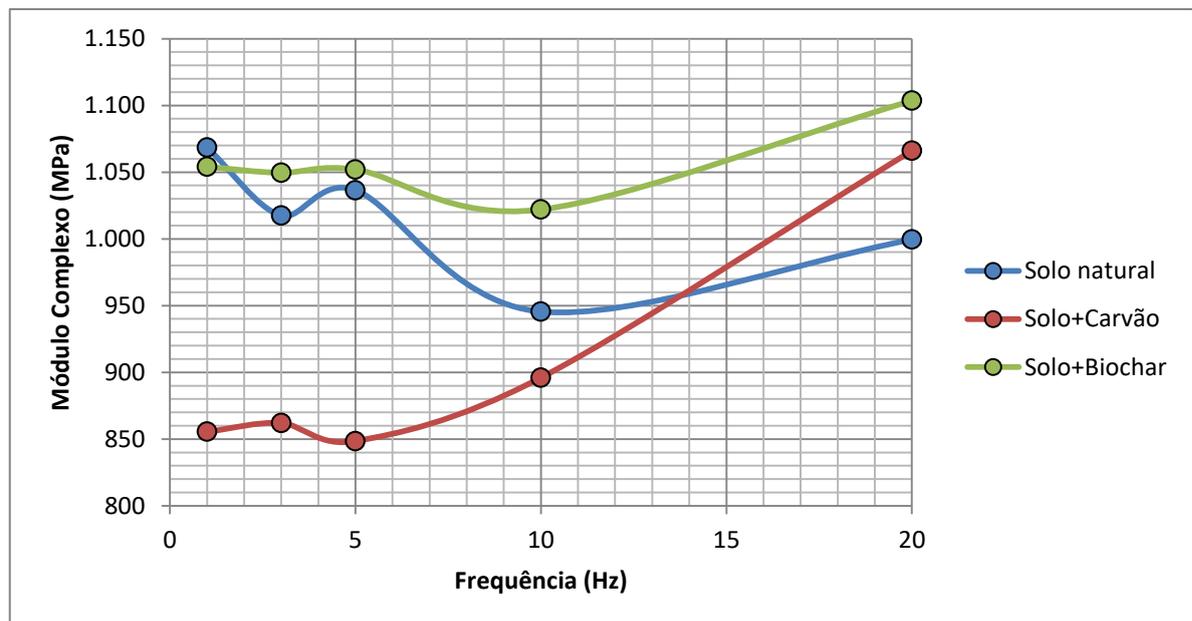


Figura 4.12 – Módulo complexo x frequência, vigas SN, SCV, e SBC

4.5.2 Vigas de concreto asfáltico

As vigas de concreto asfáltico foram preparadas conforme estabelecido na Tabela 4.8. A exemplo dos corpos de prova de solo, moldaram-se um igual número de amostras, duas vigas padrão CA, e quatro outras misturas asfálticas, sendo duas com a participação do carvão vegetal (CACV) e duas vigas com a presença do biochar (CABC), em conformidade com os

teores informados na Tabela 4.8 (Figura 4.13). Vale lembrar que tais formulações foram testadas em duas etapas. A primeira, na temperatura da ordem de 25°C, ou seja, a temperatura ambiente, e a segunda, na temperatura em torno de 40°C, representativa das condições em campo. Na Figura 4.14 têm-se as vigas de concreto asfáltico posicionadas no equipamento para realização do experimento à flexão.

CORPOS DE PROVAS PARA ENSAIO DE FLEXÃO A 4 PONTOS					
DESTINAÇÃO	AMOSTRA	MATERIAL	MODIFICADOR	TEOR	TEMPERATURA
MISTURAS ASFÁLTICAS	CA 01	Concreto asfáltico	--	--	25C / 40°C
	CA 02	Concreto asfáltico	--	--	25C / 40°C
	CACV 03	Concreto asfáltico	CARVÃO VEGETAL	3%	25C / 40°C
	CACV 04	Concreto asfáltico	CARVÃO VEGETAL	3%	25C / 40°C
	CABC 05	Concreto asfáltico	BIOCHAR	3%	25C / 40°C
	CABC 06	Concreto asfáltico	BIOCHAR	3%	25C / 40°C

Tabela 4.8 – Corpos de prova de concreto asfáltico para ensaio de flexão a 4 pontos

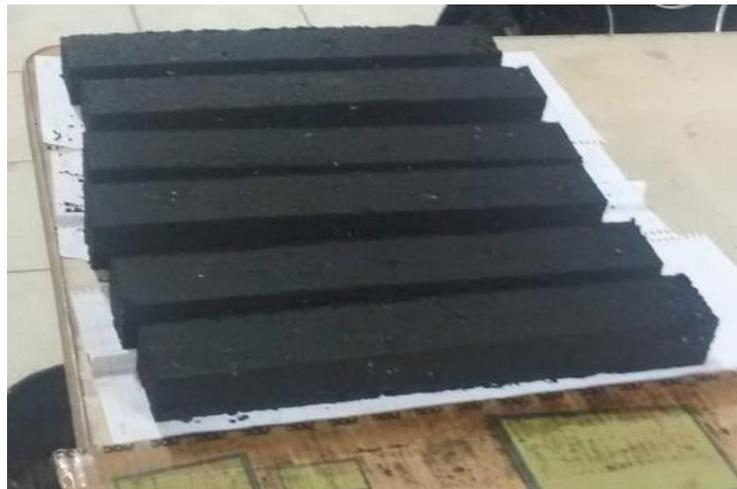


Figura 4.13 – Vigas de concreto asfáltico para ensaio de flexão a 4 pontos

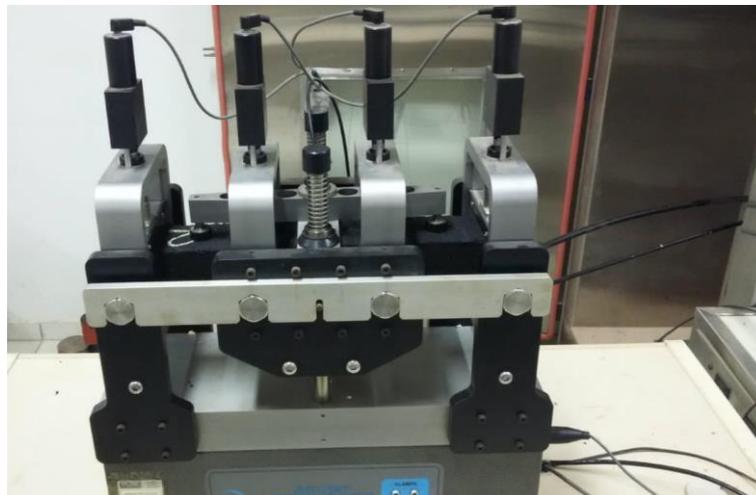


Figura 4.14 – Viga de concreto asfáltico no equipamento de flexão a 4 pontos

Depois de submetidas ao ensaio de flexão a 4 pontos atentou-se uma maior influência das propriedades viscosas nessas amostras, seguramente devido a presença do ligante betuminoso. O comportamento visco-elástico das vigas de CA pode ser percebido nos gráficos das Figuras 4.15, 4.16 e 4.17, em que é notório constatar o não alinhamento dos picos referentes aos gráficos força x tempo e deslocamento x tempo, ou seja, nas vigas de concreto asfáltico delineiam-se a influência viscosa do cimento asfáltico de petróleo, ausente nos corpos de prova de solo. Logo, a senoide do deslocamento possui amplitude maior respeitante aquela da força.

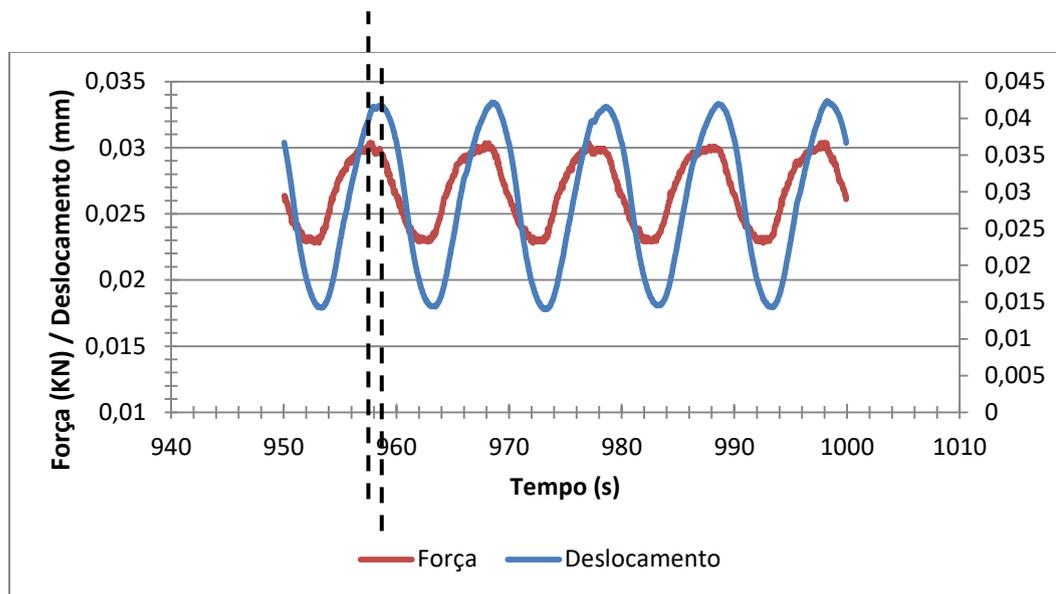


Figura 4.15 – Força e deslocamento para vigas CA

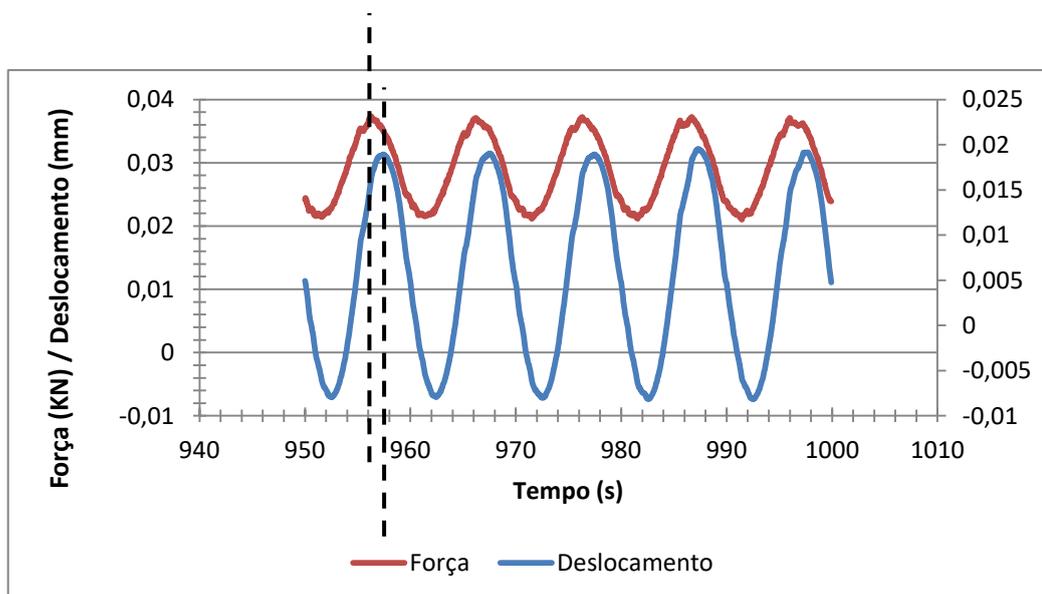


Figura 4.16 – Força e deslocamento para vigas CACV

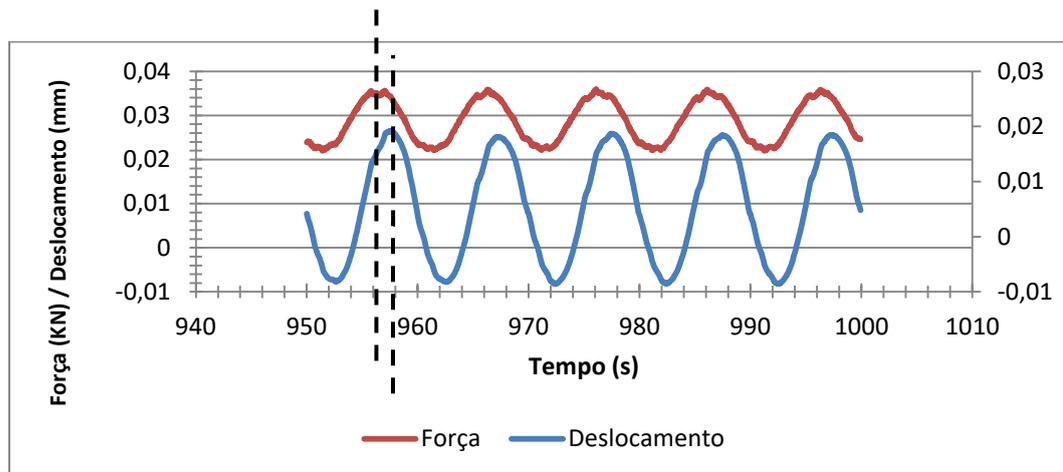


Figura 4.17 – Força e deslocamento para vigas CABC

O gráfico da senoide da força para o CA apresentou picos máximos próximos de 0,03kN. Já as senoides para as formulações CABC e CACV demonstraram picos respectivos da ordem de 0,038kN e 0,036kN. No que concerne a senoide do deslocamento, resultou valores de 0,04mm e 0,02mm para o CA e compósitos (CACV e CABC), respectivamente.

Atinente aos ângulos de fase médios, estes constam, para cada intervalo de frequência e nas temperaturas de 25°C e 40°C, na Figura 4.18. Nas vigas de concreto asfáltico (CA) observou-se que os maiores ângulos de fase são registrados para frequências menores, tais como: 1Hz, 3Hz e 5Hz. No caso do compósito CACV e a 25°C, em relação ao CA padrão, assinalou-se ângulo de fase maior apenas na a frequência de 10Hz, algo em torno de 18,59%. Nas demais frequências houve redução de acordo com os percentuais de 6,13%, 8,93%, 9,39% e 10,64% para as frequências parciais de 1Hz, 3Hz, 5Hz e 20Hz, respectivamente. A mistura CABC por sua vez, relativo ao CA referência, apontou um valor de ângulo de fase maior para a frequência de 1Hz (18,77%) e, nas demais frequências registrou-se uma redução de 3,44% (3Hz), 2,21% (5Hz), 44,23% (10Hz) e 2,13% (20Hz).

Após elevar a temperatura de ensaio para 40°C notou-se que o ângulo de fase diminuiu nas baixas frequências para o CA, ao passo que para os compósitos CACV e CABC tiveram-se maiores valores. Relativo ao concreto asfáltico padrão (CA), com o aumento da temperatura, houve uma minoração do ângulo de fase para as parciais de 1 a 5Hz, culminando numa variação percentual de 7,59%, 3,78% e 51,7%. Para as frequências de 10 e 20Hz a diferença foi de 82,69% e 74,47% em acréscimo de valores. No compósito CACV percebeu-se uma diminuição de valores em 5 e 10Hz, num total de 66,46% e 52,97% em comparação aos resultados dessa formulação na temperatura de 25°C. Quando se usou as frequências de 1Hz, 3Hz e 20Hz resultaram num aumento de 8,23%, 5,66% e 109,52%, nesta ordem. No que

tange a mistura CABC, mostrou um decréscimo do ângulo de fase apenas para 10Hz, em torno de 81,36%, e nas demais frequências houve aumento percentual aproximado de 7,74%, 0,85%, 68,97% e 78,26% concernente aos intervalos 1Hz, 3Hz, 5Hz e 20Hz, respectivamente.

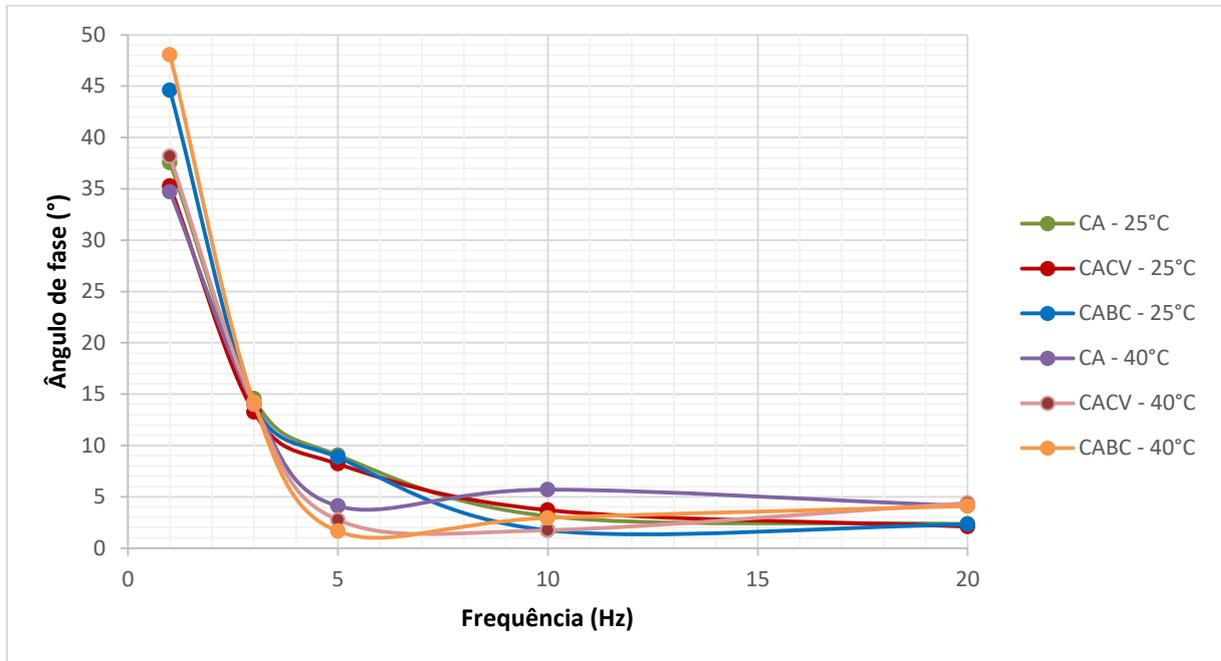


Figura 4.18 – Ângulo de fase das vigas de concreto asfáltico CA, CACV e CABC

Concernente ao módulo complexo, para as misturas asfálticas, os resultados médios são expostos nos gráficos da Figura 4.19. Nota-se, na temperatura de 25°C, e do ponto de vista da rigidez da peça, o CA padrão se constatou mais vantajoso ao compará-lo aos demais compósitos (CACV e CABC). Ainda assim, verificou-se que o compósito CACV assinalou rigidez superior relativo ao CABC. Relacionando o CA referência respeitante à formulação CACV, teve-se uma redução percentual de 7,57%, 5,96%, 2,98%, 3,62% e 8,32% para as frequências de ensaio de 1 a 20Hz. Ao cotejar com o compósito CABC observou-se uma diminuição de valores com diferença percentual de 20,81%, 22,07%, 22,35%, 19,83% e 17,92% nas frequências de 1 a 20Hz.

Ao se submeter às vigas de concreto asfáltico, com e sem aditivos, ao ensaio de flexão a 4 pontos, numa temperatura de 40°C, notou-se que os valores para o módulo de rigidez diminuíram, devido ao fato de sobressair as propriedades viscosas do material ao se aumentar a temperatura. Para tal, as amostras aditadas com carvão e biochar (CACV e CABC) geraram módulo complexo superior referente aos corpos de prova padrão de CA. A mistura CACV, por exemplo, apresentou os maiores valores, atinente a formulação CABC. Nessa temperatura

o compósito CACV, em relação ao CA referência, mostrou um aumento de rigidez para as frequências de 5, 10 e 20Hz, numa variação percentual respectiva de 15,45%, 28,71% e 30,11%, porém registrou diminuição de rigidez nas parciais de 1Hz e 3Hz, 8,11% e 2,86%. Ao se analisar o compósito com biochar (CABC) e confrontando com o concreto asfáltico não aditado (CA), teve-se acréscimo de rigidez também nas frequências de 5 a 20Hz, sendo pela ordem iguais a 9,09%, 8,71% e 28,49%, logo, resultados inferiores aos obtidos pelo CACV.

De um modo geral, para as vigas de misturas asfálticas (CA, CACV e CABC), os valores do módulo complexo se apresentaram de forma crescente mediante o aumento das frequências de ensaio, tal como se constata na Figura 4.19.

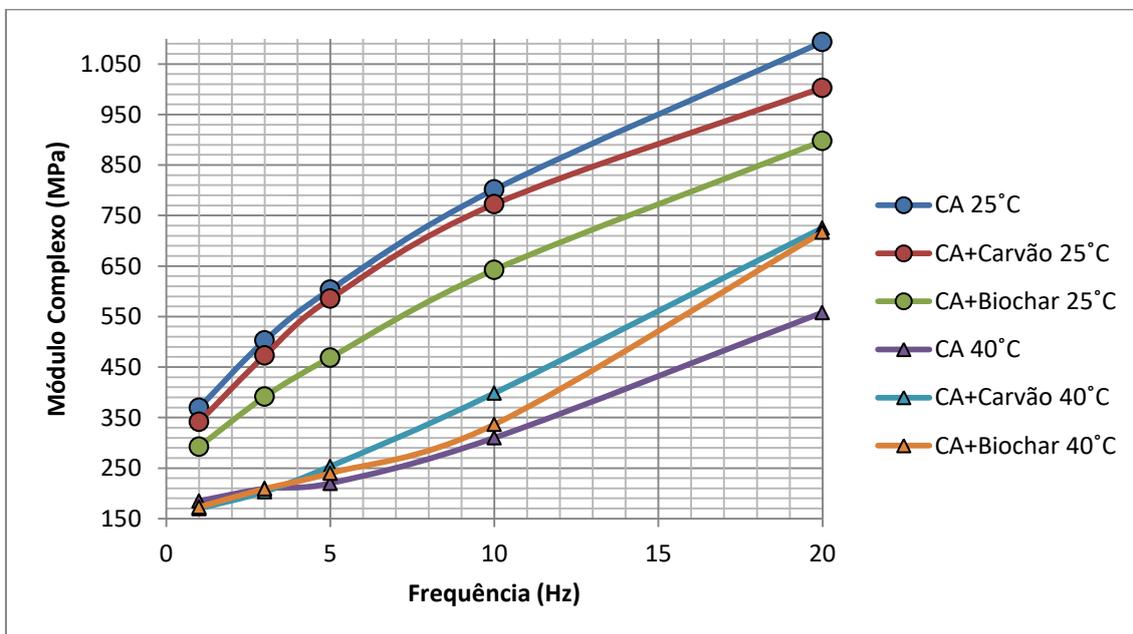


Figura 4.19 – Módulo complexo x frequência das misturas asfálticas CA, CACV e CABC

CAPÍTULO 5

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O Biochar, ou simplesmente biocarvão foi estudado como participante de compósitos destinados tanto para subcamadas quanto para revestimentos asfálticos de pavimentos flexíveis. Seus resultados foram comparados com o carvão vegetal comum oriundo da queima de madeiras típicas da região amazônica.

Do ponto de vista da flexão pura, os compósitos destinados a subcamadas de pavimentos, em que havia a participação do biochar, mostraram superioridade em rigidez se comparado ao solo argiloso natural e às formulações com carvão vegetal. A maior diferença nos resultados do módulo complexo registrou-se para as frequências de 10Hz (8,03%) e 20Hz (10,40%). O solo-carvão vegetal (SCV), por sua vez, apresentou resultados inferiores se comparado ao solo “*in natura*”, sendo as maiores diferenças percentuais encontradas nas frequências de 1Hz (19,93%), 3Hz (15,32%) e 5Hz (18,13%). O gráfico que relaciona o módulo de rigidez e as frequências de ensaio exibe um comportamento ascendente e descendente, portanto, expõe uma variação desse parâmetro.

O comportamento visco-elástico das vigas de solo faz alusão aos sólidos hookenos, visto que os picos dos gráficos de tensão e deformação são muito próximos, elucidando a ideia de que o ângulo de fase tende a zero para as composições de solo natural, solo aditado com biochar e solo-carvão vegetal.

Respeitante aos compósitos de concreto asfáltico observou-se que a presença do ligante betuminoso condiciona uma maior influência de suas propriedades viscosas resultando em gráficos de tensão e deformação, relacionados ao tempo, senoidais, cujos picos possuem maior defasagem se comparados às formulações com solo.

No que concerne à rigidez das vigas confeccionadas em concreto asfáltico, notou-se que para temperatura ambiente da ordem de 25°C o CA não aditado possui módulo complexo superior as vigas formuladas com respectiva adição de carvão vegetal e biochar. Para a composição CACV a diferença percentual é maior par 1Hz (7,57%), 3Hz (5,96%) e 20Hz (8,32%), já para o CABV a diferença foi maior e registrada nas parciais de 1Hz (20,81%), 3Hz (22,07%) e 5Hz (22,35%). No entanto, em uma temperatura de trabalho da ordem de 40°C, mais realista da superfície dos pavimentos da cidade de Manaus/AM, verificou-se que os compósitos com biochar e carvão vegetal passam a ter rigidez superior, se comparado ao CA não aditado, dando destaque para o carvão vegetal, o qual se mostrou

mais vantajoso, até mesmo relativo ao biochar, obtendo um aumento de rigidez da ordem de 15,45%, 28,71% e 30,11% para os intervalos de 5Hz, 10Hz e 20Hz, respectivamente. Diferentemente do ocorrido nas misturas com solo, para as formulações CA, CACV e CABO o gráfico que relaciona módulo de rigidez e frequência de ensaio apresenta comportamento padrão crescente.

Por fim, a utilização de biochar ainda é muito recente em pesquisas voltadas para pavimentação viária, o que deixa ampla linha de pesquisa científica a ser implementada. Desse modo, sugere-se para estudos futuros:

- a) A utilização de novos teores de biochar e carvão vegetal para formulações com solo, tais como os teores de 20 e 30%;
- b) O emprego de novos teores de biochar e carvão vegetal para composições em misturas asfálticas, tais como 5% e 7%;
- c) Realizar o ensaio de tração indireta por compressão diametral, tendo como finalidade comparar os resultados de módulo complexo tanto em compósito com solo quanto os formulados com concreto asfáltico;
- d) Aditar ao biochar elementos com propriedades cimentantes, analisando em seguida o comportamento mecânico pelo ensaio de flexão a 4 pontos, confrontando as obtenções de ângulo de fase e módulo complexo;
- e) Realizar ensaio de caracterização mecânica por aparelho de flexão a 4 pontos com biochar nanonizado;
- f) Analisar o comportamento mecânico por flexão a quatro pontos para biochar oriundo de outras biomassas ademais do ouriço de castanha da Amazônia.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO – TP-31-96: Standart Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension ,2000.

AATHEESAN, T.; ARULRAJAH, A.; NEWMAN, G.; BO, M.W.; WILSON, J. Crushed brick blends with crushed concrete for pavement sub-base and drainage applications. **Australian Geomechanics**, vol. 44, n 2, 2009.

ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7217: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 1987.

ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508: Grão de solo que passam na peneira 4,8mm – determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Solo – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182: Solo – ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986.

ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: Amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

ANP- AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Resolução ANP nº19/2005, 2005.

ARAÚJO, Marcelo Almeida; et. al. Análise Comparativa de Métodos de Pavimentação – Pavimento Rígido (concreto) x Flexível (asfalto). Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, ANO 1. VOL. 10, Pp. 187-196. Novembro de 2016 – ISSN.2448-0959

ASTM- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM – C127: Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, 2012.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM – C128: Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of fine Aggregate, 2012.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM – C126: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, 2006.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM – D 4123: Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures, 1995.

BASTOS, W. de L.Mariano Procópio Ferreira Lage – Sua Vida, Sua Obra, Descendência, Genealogia. 2.ed., Juiz de Fora: Edições Paraibuna, 1991.p. 23 e 24.

BRITO, L. A. T.; CERATTI, J. A. P.; VICTORINO, D. R. Indicadores do desempenho de misturas asfálticas determinados através do ensaio de compressão diametral. **Transportes**, vol. 16, p. 36-44, 2008.

BROWN, E.R.; HADDOCK, J. E.; MALLICK, R. B.; LYNN, T. A. Development of a mixture design procedure for stone matrix asphalt (SMA). National Center for Asphalt Technology, Auburn University, 1997.

CANDIDO, A. Técnicas de reforço de subleito. **Uniplac**, vol. 4, n. 1, 2016.

CASSU, S.N. Comportamento dinâmico-mecânico e relaxações em polímeros e blendas poliméricas. **Quim. Nova**, vol. 28, p. 255-263, 2005.

CHANG, C. W.; DO, Y. H.; YEON, L. J. Mechanical Properties of Mortar Containing Bio-Char from Pyrolysis. **Journal of Korea**, Vol. 16, n. 3, 2012.

COLLANTES, R. C. P. Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada y/o subbase de pavimentos. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Geotécnica), Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.

COLLANTES, R. C. P.; COLLANTES, C. A. P.; VIZCARRA, G. O. C.; LÁZARES, J. G. Estabilização de solo argiloso com cinzas de carvão com fins de aplicação em sub-base de pavimento no Perú. 17º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Goiânia. 2014.

DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 6. ed. São Paulo: Copyright, 2007.

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

DNIT- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. 136/2010-ME: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral . Rio de Janeiro, 2010.

DUNKE, M. P. Concreto asfáltico drenante com fibras de celulose, ligante modificado por polímero e asfalto-borracha. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

FALCÃO, N. P.; TSAI, S. N.; O'NEILL, B.; CANNAVAN, F. S. **Amazonian Dark Earths: Wim Sombroek's Vision. The microbial world of Terra Preta**: Springer, Dordrecht, 2009.

FERNANDES, D. C. M.; MACHADO, C. C.; LIMA, D. C.; PEREIRA, R. S. Emprego de misturas solo-alcatrão de madeira de eucalipto em estradas florestais. **Cerne**, vol. 8, p. 42-48, 2002.

FILHO, E. R. **Transportes e modais: com suporte de TI e SI**. 1. ed. Curitiba: InterSaberes, 2012.

FREITAS, H. B.; MOTTA, L. M. G. Uso de escória de aciaria em misturas asfálticas de módulo elevado. **Transportes**, vol. 16, p. 5 - 12, 2008.

IPR- INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS. Publicação IPR-719: Manual de pavimentação. Rio de Janeiro, 2006.

JÚNIOR, E. P. **Manual de obras rodoviárias e pavimentação urbana – execução e fiscalização**. 1. ed. São Paulo: PINI, 2014.

KLINSKY, L.M.G.; GLAUCO, T. P. S. Reaproveitamento da areia de fundição como material de base e sub-base de pavimentos flexíveis. **Transportes**, vol. 17, p. 36-45, 2009.

LAGES, R.G.; VIDAL, D. Métodos convencionais no dimensionamento de pavimentos com base reforçada utilizando geossintéticos. ITA, 2003.

LEAL, C. L. D.; CASTRO, P. F. Aproveitamento da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como fíler em concreto asfáltico. **Vértices**, vol. 9, n 1/3, 2007.

LEE, S. H. **Introdução ao projeto geométrico de rodovias**. 4. ed. Florianópolis: Ufsc, 2015.

LEMO, M.; SANTOS, A. A. Reforço de subleito com geogrelha – estudo de caso. 2013. TCC (Graduação em Engenharia Civil), Universidade do extremo sul Catarinense, Florianópolis.

LIMA, D. M.; AMORIN, M. M.; JÚNIOR, H. C. L.; BARBOSA, N. P.; WILRICH, F. L. Avaliação do comportamento de vigas de bambu laminado colado submetidas à flexão. **Ambiente construído**, vol. 14, p. 15-27, 2014.

MACHADO, R. Z. Asfalto modificado com polímero SBS para pavimentos drenantes. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

MAIA, C. M. B. F. Biochar: uma nova ferramenta no manejo de solos. Anais do II Seminário de Atualização Florestal e XI Semana de Estudos Florestais. Irati. 2010.

MARÊ, F. L. História das infra-estruturas rodoviárias. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade do Porto, Porto.

MOREIRA, J. P. Contribuição para a reutilização de material fresado em camadas estruturais de pavimento. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Rodoviária), Universidade do Minho, Braga.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2006.

REVISTA BIOMASSA E ENERGIA. Biomassa da cana-de-açúcar tem potencial para se tornar a principal fonte de geração de energia elétrica em SP, 03 de outubro de 2016.

RIBEIRO, S. P. T. Terraplenagem. Metodologia e técnicas de compactação. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade do Porto, Porto.

SANTOS, K. P.; LUCENA, A. E. F. L.; LUCENA, L. C. F. L.; SILVA, J. A. A.; COSTA, S. C. F. E. Estudo da incorporação de argilas montmorilonitas em cimentos asfálticos de petróleo. **Matéria**, vol. 20, pp. 501-513, 2015.

SILVA, A.C. L.; FROTA, C. A.; FROTA, H. O. Módulo complexo de compósitos asfálticos com argila calcinada sob flexão a quatro pontos. **Matéria**, vol. 20, pp. 436-451, 2015.

SILVA, C. L. A.; SILVA, C. L.; REBELO, E. P.; FROTA, C. A. Processo produtivo de agregados sinterizados de argila calcinada para a região Amazônica. **Estudos tecnológicos**, vol. 5, p. 374-388, 2009.

VALENÇA, P.M. A.; FROTA, C. A. Misturas Areia-Asfalto com fibra do açaí e resíduo da construção civil para a cidade de Manaus. **T&C Amazônia**, vol. 21, p. 50-54, 2011.

WALTERS, R.C.; FINI, E. H.; LEBDED, T. A. Enhancing asphalt rheological behavior and aging susceptibility using bio-char and nano-clay. **American Journal of Engineering and Applied Sciences**, vol. 7, p. 66-76, 2014.

WALTERS, R.C.; FINI, E. H.; LEBDED, T. A. Introducing combination of nano-clay and bio-char to enhance asphalt binder's rheological and aging characteristics. **Internacional Journal of Pavement Research and technology**, vol. 7, n. 6, 2014.

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

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