

CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ

MYLENA DALL'AGNOL

ROSANA APARECIDA LIMA

**COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA REDUÇÃO DAS ESPESSURAS DE
CAMADAS DE ROLAMENTO EM CBUQ UTILIZANDO CAP 50/70, CAP SBS 65/90
E CAP ECOFLEX AB-8**

**CASCATEL - PR
2018**

CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ

MYLENA DALL'AGNOL

ROSANA APARECIDA LIMA

**COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA REDUÇÃO DAS ESPESSURAS DE
CAMADAS DE ROLAMENTO EM CBUQ UTILIZANDO CAP 50/70, CAP SBS 65/90
E CAP ECOFLEX AB-8**

Trabalho apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Civil, do Centro Universitário FAG, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Professor Orientador: Esp. Engenheiro Civil Lincoln Salgado.

**CASCADEL - PR
2018**

DEDICATÓRIA

Dedicamos este trabalho aos nossos pais, namorado e amigos, que nos motivaram, compreenderam nossa falta em alguns momentos e nos deram força para continuar quando achamos que não era possível.

AGRADECIMENTOS

Com grande satisfação agradecemos todos aqueles que foram importantes para nós nesta caminhada. Primeiramente agradecemos a Deus por nos ter dado saúde, coragem e muita força para concluir este trabalho, sempre nos iluminando e nos guiando no caminho correto.

Aos nossos pais, Lauri e Rosmari (pais da Mylena) e Nercina (mãe da Rosana), nosso expresso reconhecimento por sempre nos encorajar e ter muita paciência conosco, foram fundamentais para que fosse possível finalizar o trabalho. O Dorcelino (pai da Rosana) mesmo não estando presente fisicamente, temos a certeza que sempre esteve nos abençoando durante o projeto.

Ao professor e orientador Eng. Lincoln Salgado, por todas as orientações, ensinamentos e dedicação.

A esta instituição e a todo o seu corpo docente, que possuem alta qualificação para ensinar e se dedicar ao aprendizado do aluno.

A todos os nossos familiares, amigos e namorado, que fizeram parte da nossa formação torcendo por nossa vitória e sempre estando do nosso lado em todos os momentos desta caminhada.

EPÍGRAFE

“O sucesso é ir de fracasso em fracasso sem perder o entusiasmo.”

Winston Churchill

RESUMO

No Brasil o modal rodoviário é o principal meio de transporte, movimenta bens e pessoas por todo o país, porém, enfrenta graves problemas pela falta de qualidade da infraestrutura do país. Segundo a CNT (Confederação Nacional de Transporte), apenas 12,4% da malha é pavimentada, sendo que a frota aumentou 63,6% nos últimos anos. Além da baixa área de pavimentação, muitas pistas estão precárias pelo aumento da frota, sendo assim, surgiu à necessidade do uso de ligantes asfálticos modificados, pois apresentam melhores resistências ao volume de tráfego e a durabilidade do material, além da melhoria das propriedades mecânicas do pavimento. Este trabalho teve o intuito de comparar três tipos de cimentos asfálticos de petróleo (CAP), o CAP convencional, CAP modificado por polímero e o CAP modificado por pó de borracha, através desse estudo, foi possível analisar as diferentes características mecânicas de cada um e se é possível reduzir a espessura da camada de rolamento entre eles. A metodologia utilizada foi o método mecanístico-empírico para dimensionar a espessura da camada de rolamento do concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) com o CAP 50/70, CAP ECOFLEX AB-8 e CAP SBS 65/90, onde foram moldados corpos de prova através do método *Marshall*, logo após, esses corpos de prova foram utilizados para a realização dos ensaios que determinam o módulo de resiliência e resistência a tração. Através dos resultados foi utilizado um *software* para dimensionar a camada de rolamento do pavimento flexível para cada CAP. Este estudo explica e contribui para a escolha do melhor material aglutinante do CBUQ, assim, evitando a degradação em curto prazo da pista e oferecendo melhor infraestrutura para aos que trafegam.

Palavras-chave: Convencional, modificado, borracha, polímero, dimensionamento.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura do pavimento flexível	20
Figura 2: Dimensionamento CBUQ CAP 50/70	45
Figura 3: Dimensionamento CBUQ CAP ECOFLEX AB-8	45
Figura 4: Dimensionamento CBUQ CAP SBS 65/90	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição granulométrica faixa “C” DNIT 031/2006	29
Tabela 2: Composição granulométrica faixa “C” DNIT-ES 112/09	30
Tabela 3: Composição granulométrica faixa “C” DNER-ES 385/99	30
Tabela 4: Materiais para o traço	31
Tabela 5: Estrutura tipo pavimento.....	36
Tabela 6: Característica dos agregados.....	37
Tabela 7: Limite do índice de vazios	38
Tabela 8: Limite da relação betume/vazios.....	39
Tabela 9: Limite da estabilidade mínima	40
Tabela 10: Limite de fluência.....	41
Tabela 11: Comparação das espessuras do CAP 50/70 e o CAP ECOFLEX AB-8	46
Tabela 12: Comparação das espessuras do CAP 50/70 e o CAP SBS 65/90.....	47
Tabela 13: Comparação das espessuras do CAP ECOFLEX AB-8 e o CAP SBS 65/90.....	48

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Quantidade de CAP.....	32
Equação 2: Módulo de resiliência.....	34
Equação 3: Resistência a tração.....	34

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Curva Granulométrica Faixa "C" CAP 50/70.....	38
Gráfico 2: Resultado do índice de vazios.....	39
Gráfico 3: Resultado da relação betume/vazios	40
Gráfico 4: Resultado da estabilidade mínima.....	41
Gráfico 5: Resultado da fluência	42
Gráfico 6: Resultado da resistência a tração	43
Gráfico 7: Resultado do módulo de resiliência	44
Gráfico 8: Comparação das espessuras do CAP 50/70 e o CAP ECOFLEX AB-8 e a redução	47
Gráfico 9: Comparação das espessuras do CAP 50/70 e o CAP SBS 65/90 e a redução	47
Gráfico 10: Comparação das espessuras do CAP ECOFLEX AB-8 e o CAP SBS 65/90 e a redução.....	48

LISTA DE ABREVIATURAS

°C	Celsius
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CAN	Cimento Asfáltico Natural
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
cm²	Centímetro Quadrado
cm	Centímetro
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EAP	Emulsão Asfáltica de Petróleo
Kg	Quilograma
kgf	Quilograma-força
mm	Milímetros
MR	Módulo de Resiliência
NBR	Norma Brasileira
RL	Ruptura Lenta
RM	Ruptura Média
RR	Ruptura Rápida
RT	Resistência a Tração
SBS	Estireno-butadieno-estireno
SBR	Butadieno-estireno

SUMÁRIO

1 CAPÍTULO 1	15
1.1 INTRODUÇÃO	15
1.2 OBJETIVOS	16
1.2.1 Objetivo geral.....	16
1.2.2 Objetivos específicos.....	16
1.3 JUSTIFICATIVA.....	16
1.4 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	17
1.5 FORMULAÇÃO DA HIPÓTESE	17
1.6 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	17
2 CAPÍTULO 2	18
2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1.1 DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS PAVIMENTOS	18
2.1.2 Pavimento flexível	18
2.1.3 Pavimento rígido	19
2.1.4 Pavimento semirrígido.....	19
2.2 ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS	19
2.2.1 Estrutura de pavimento flexível	20
2.2.1.1 Subleito	20
2.2.1.2 Regularização do subleito	20
2.2.1.3 Reforço do subleito	21
2.2.1.4 Sub-base.....	21
2.2.1.5 Base	21
2.2.1.6 Revestimento.....	21
2.3 MATERIAIS PARA PAVIMENTAÇÃO.....	22
2.3.1 Agregados	22
2.3.1.1 Classificação quanto à natureza	22
2.3.1.2 Classificação quanto ao tamanho	22
2.3.1.3 Classificação quanto à distribuição	23
2.3.2 Materiais betuminosos.....	23
2.3.2.1 Cimento asfáltico.....	24

2.3.2.2 Asfalto diluído.....	24
2.3.2.3 Emulsão asfáltica.....	24
2.4 CIMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO	24
2.4.1 Polímeros para pavimentação	24
2.4.2 Melhorias que o polímero emprega.....	25
2.4.3 Asfalto modificado por adição de polímero SBS.....	25
2.4.4 Asfalto modificado por adição de pó de borracha triturada	25
2.5 MISTURA ASFÁLTICA	26
2.5.1 Concreto asfáltico usinado a quente.....	26
2.5.2 Propriedades da mistura	26
2.6 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS.....	27
2.6.1 Método empírico	27
2.6.2 Método empírico-mecanístico	27
2.6.3 Método mecanístico	27
2.7 DIMENSIONAMENTO DE CAMADA DE ROLAMENTO	28
2.7.1 Determinação da espessura da camada de rolamento	28
3 CAPÍTULO 3	29
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA	29
3.1.1 Faixa granulométrica de trabalho	29
3.2 MATERIAIS.....	31
3.3 MÉTODO	31
3.3.1 Método <i>Marshall</i>	31
3.3.1.1 Corpo de prova <i>Marshall</i>	32
3.3.2 Módulo de Resiliência	33
3.3.3 Resistência a tração	34
3.3.4 Dimensionamento	35
3.3.4.1 Condição climática	35
3.3.4.2 Volume de tráfego	35
3.3.4.3 Estrutura do pavimento.....	35
3.3.5 Análise dos dados.....	36
4 CAPÍTULO 4	37
4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
4.1.2 Composição granulométrica	37
4.1.2.1 Índice de vazios.....	38

4.1.2.2 Relação betume/vazios	39
4.1.2.3 Estabilidade mínima	40
4.1.2.4 Fluência.....	41
4.1.3 Módulo de Resiliência.....	42
4.1.5 Resistência a tração	43
4.1.6 Dimensionamento	44
5 CAPÍTULO 5	47
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
6 CAPÍTULO 6	49
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	49
REFERÊNCIAS.....	50
ANEXO A - GRANULOMETRIA DOS AGREGADOS E DOSAGEM DA MISTURA	52

CAPÍTULO 1

1.1 INTRODUÇÃO

As vias possibilitam o acesso da população a recursos essenciais, tais como: educação, saúde, cultura, lazer, trabalho e convívio social (BALBO, 2007). Sendo assim, a pavimentação é de grande importância para toda a sociedade, tendo em vista que facilita a vida dos usuários, disponibilizando novos trajetos.

O início da pavimentação veio com a necessidade do homem expandir de áreas cultiváveis e territórios de influência, tendo a China como país desbravador. Anos mais tarde, os romanos aprimoraram as estradas, tornando-as mais duradouras. Com isso, houve o entendimento de que as rodovias faziam parte de uma sociedade desenvolvida, pelo fato de potencializar interesses políticos e econômicos da região, fornecendo acesso a todas as áreas e facilitando o comércio (BALBO, 2007).

A construção da primeira estrada no Brasil teve início em 1560 e ligava São Vicente ao Planalto Piratininga, chamada Estrada do Mar ou Velha do Mar. No ano de 1789 a estrada foi recuperada e parte dela foi feita com lajes de granito. Cento e trinta e três (133) anos depois, houve a necessidade de realizar outra reforma, utilizando concreto em seu trecho mais inclinado. Outra estrada de grande importância foi a Estrada Real, também conhecida como Caminho do Ouro, originou de uma trilha utilizada pelos índios. A estrada possui dois acessos, sendo que o mais antigo liga Ouro Preto (MG) à Paraty (RJ) e o mais novo, Rio de Janeiro (RJ) à Diamantina (MG). Assim iniciou-se a história da pavimentação do país (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Ao transcorrer da história, as vias tornaram-se cada dia mais importante para o desenvolvimento da sociedade. Dessa forma, na medida em que as rotas eram ampliadas, a necessidade de melhorias em relação à qualidade e segurança também aumentava. Assim, surgiu o desenvolvimento de ligantes modificados, com o objetivo de aprimorar as propriedades físicas e mecânicas dos pavimentos.

A estrutura de um pavimento flexível é basicamente composta por diversas camadas, sendo elas: subleito, reforço do subleito, sub-base, base, blinder (camada de ligação, resistente e mais econômica) e camada de rolamento, as quais acomodam as flexões geradas pelas cargas do tráfego, que até certo limite não levam ao rompimento.

Foi desenvolvida uma análise comparativa na camada de rolamento do pavimento flexível em concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), comparando o CAP 50/70, o CAP modificado com polímero SBS e o CAP modificado com pó de borracha de pneus, com o objetivo de verificar o percentual da redução da espessura da camada de rolamento do pavimento flexível, as características mecânicas e a diferença de resiliência entre os CBUQ's com os três tipos de CAP.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Comparar o percentual da redução de espessura da camada de rolamento do pavimento flexível, utilizando na composição do CBUQ o CAP 50/70, o CAP modificado com polímero SBS 65/90 e o CAP modificado com pó de borracha do tipo ECOFLEX AB-8.

1.2.2 Objetivos específicos

- Dimensionar as camadas de rolamento do pavimento flexível em CBUQ com CAP 50/70, CAP SBS 65/90 e com CAP ECOFLEX AB-8;
- Comparar a espessura da camada de rolamento do pavimento flexível em CBUQ com CAP 50/70, CAP SBS 65/90 e com CAP ECOFLEX AB-8;
- Comparar as características mecânicas da camada de rolamento do pavimento flexível em CBUQ com CAP 50/70, CAP SBS 65/90 e com CAP ECOFLEX AB-8;
- Comparar a diferença de resiliência entre os CBUQ's com CAP 50/70, CAP SBS 65/90 e com CAP ECOFLEX AB-8.

1.3 JUSTIFICATIVA

O uso de ligantes asfálticos modificados aumenta a cada ano, devido ao fato do crescente número de veículos nas vias e os ligantes convencionais não atenderem mais ao tráfego constante e as variações climáticas. Segundo Bernucci *et.al.* (2006), a utilização de CAP modificados por polímero ou pó de borracha é uma das formas de deixar o concreto asfáltico menos sensível às variações térmicas e aos carregamentos nas vias.

A adição de ligantes modificados auxilia nas propriedades do CAP, como no aumento da viscosidade, na recuperação após a deformação (efeito elástico) e na melhor resistência ao envelhecimento, como, por exemplo, ao surgimento de fissuras.

Portanto, pretende-se fazer uma comparação do dimensionamento da camada de rolamento de pavimento flexível em CBUQ, com CAP 50/70, CAP modificado por polímero SBS e com o CAP modificado por borracha, com o intuito de analisar as propriedades mecânicas de cada um e comparar a redução da espessura da camada de rolamento.

1.4 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Existe a possibilidade de reduzir a espessura da camada de rolamento do pavimento flexível em CBUQ trocando o CAP convencional pelos CAP modificados?

1.5 FORMULAÇÃO DA HIPÓTESE

Os CAP modificados possibilitam a redução da espessura da camada de rolamento do pavimento flexível em CBUQ.

1.6 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Os ensaios para a determinação do módulo de resiliência e da resistência a tração foram realizados na sede da SAMP CONSTRUTORA DE OBRAS LTDA, situada no município de São Miguel do Iguaçu, comparando as características mecânicas do CAP 50/70, CAP modificado com polímero SBS 65/90 e do CAP ECOFLEX AB-8. Também foi realizado a comparação da espessura das camadas de rolamento, analisando a possibilidade de redução através do método de dimensionamento mecanístico-empírico.

CAPÍTULO 2

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com Bernucci *et al.* (2006), o asfalto é um dos materiais mais antigo utilizado pelo homem, desde a agricultura até a indústria. O seu uso em pavimentação é um dos mais importantes. Na maioria dos países a pavimentação asfáltica é a principal forma de revestimento.

O revestimento é a camada que se destina a receber a carga dos veículos e as ações climáticas. Portanto, deve ser o mais impermeável possível e resistente aos esforços recebidos pelo tráfego, que varia conforme a carga e velocidade dos veículos. Sendo assim, a pavimentação deve dar estabilidade à superfície de rolamento, conforto e segurança aos usuários (SENÇO, 2007).

2.1.1 Definição e classificação dos pavimentos

Pavimento é uma estrutura de inúmeras camadas de espessuras finitas, basicamente composta de agregados e ligantes asfálticos. Ele é implantado na superfície do solo terraplanado, que tem como objetivo resistir esforços gerados pelo tráfego de veículos e ações climáticas, gerando melhorias nas rodovias, com conforto, segurança e economia (BERNUCCI *et al.* 2006).

De acordo com Senço (2007), o pavimento pode ser classificado como pavimento rígido, pavimento flexível e pavimento semirrígido, conforme os materiais que o constitui.

2.1.2 Pavimento flexível

É aquele que sofre deformação elástica gerada por carregamentos, porém sem ocorrer o rompimento da estrutura (SENÇO, 2007).

Segundo Bernucci *et al.* (2006), a composição do pavimento flexível é substancialmente de ligante asfáltico e agregados. A estrutura é constituída pelas camadas essenciais, sendo elas: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito.

A estrutura é dimensionada de acordo com as cargas de tração e compressão resultantes da flexão, que geram deformações ocasionadas pelos esforços do tráfego de veículos, livrando-se da deformação inalterável e da ruptura da estrutura por fadiga (BALBO, 2007).

2.1.3 Pavimento rígido

Pavimento rígido é definido como pouco deformável. São aqueles que atingem a ruptura por tração na flexão em consequência da deformação (SENÇO, 2007).

O revestimento possui uma rigidez em sua estrutura, que tem a função de absorver as cargas geradas pelos carregamentos e distribuí-las nas camadas inferiores (DNIT, 2006).

De acordo com Balbo (2007), a estrutura é constituída por blocos ou placas de concreto, podendo ser armadas ou não com barras de aço. O dimensionamento é condizente com a resistência à flexão das placas ou blocos de concretos e suas camadas inferiores, tendo seu revestimento composto por cimento Portland.

2.1.4 Pavimento semirrígido

De acordo com Senço (2007), é uma estrutura mista, composta por camadas flexíveis e rígidas na mesma estrutura de pavimento, dimensionada em função da tração à flexão.

2.2 ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS

O pavimento possui uma estrutura composta por diversos tipos de materiais em cada camada, no qual o revestimento asfáltico é constituído fundamentalmente por uma mistura de agregados e ligantes asfálticos. As camadas são subdivididas basicamente em quatro: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito. A estrutura tem a função indispensável de atender o tráfego diário de veículos, evitando os danos estruturais que causam trincamentos por fadiga. No entanto, cada camada possui um comportamento diferente, tornando-se necessário conhecer as propriedades dos materiais utilizados (BERNUCCI *et al.*, 2006).

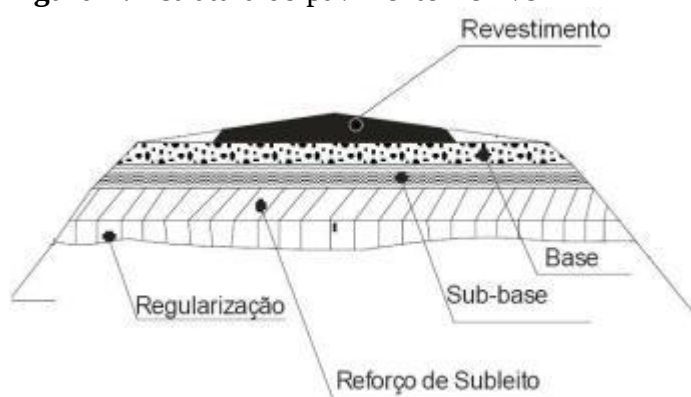
Segundo Balbo (2007), as estruturas de pavimento têm a missão de suportar os esforços resultantes de cargas e ações climáticas, sem apresentar processo de deterioração

precoce. Sendo assim, cada camada da estrutura possui uma ou mais funções específicas, proporcionando condições adequadas de rolamento aos veículos.

2.2.1 Estrutura de pavimento flexível

A estrutura de um pavimento flexível é composta por camadas que possuem características próprias, conforme a necessidade da via. A Figura 1 (DNIT, 2006) apresenta essas camadas.

Figura 1: Estrutura do pavimento flexível



Fonte: DNIT (2006)

2.2.1.1 Subleito

O subleito é o terreno de fundação do pavimento que apresenta as características geométricas do solo, é a camada mais próxima da superfície, pois a proporção em que se afasta da superfície, a tensão se torna menor até ficar desprezível (SENÇO, 2007).

Segundo Balbo (2007), o subleito é constituído por material natural e compactado. A maior preocupação é a resistência na camada superior do mesmo, sendo que é capaz de resistir a maiores esforços.

2.2.1.2 Regularização do subleito

De acordo com Senço (2007), é a camada de espessura irregular sobre o subleito, que pode ser regularizada com corte e aterro, com a finalidade de estabelecer conformidade à superfície.

2.2.1.3 Reforço do subleito

O reforço do subleito é a camada que possui matérias de maior qualidade, assim, fornecendo maior resistência. É aplicada acima do subleito quando o mesmo possui pouca resistência, aliviando as tensões aplicadas sobre ele. Ao aplicar essa camada há uma maior economia, devido ao fato de não haver necessidade de colocar grandes camadas de base e sub-base acima (BALBO, 2007).

2.2.1.4 Sub-base

É a camada complementar a base, pois não é recomendado que seja feita a construção da base diretamente sobre a regularização ou reforço do subleito, devido às circunstâncias técnicas e econômicas (SENÇO, 2007).

2.2.1.5 Base

A base é uma camada feita acima da sub-base, que tem como função sustentar os esforços gerados na superfície e distribuí-los nas outras camadas (DNIT, 2006).

Segundo Balbo (2007), os materiais constituídos na base são solos estabilizados naturalmente, solos misturados e agregados, como, por exemplo, solo com a brita.

2.2.1.6 Revestimento

Segundo Senço (2007), o revestimento também é chamado de capa ou capa de rolamento, o qual deve ser impermeável. É a camada que recebe diretamente a ação do tráfego e que tem a finalidade de melhorar a superfície de rolamento, transmitindo conforto e segurança, além de aumentar a durabilidade da estrutura.

Para Balbo (2007), o revestimento deve receber as cargas sem sofrer grandes deformações elásticas ou plásticas e desagregação dos componentes. Com isso, muitas vezes os revestimentos são subdivididos em mais de uma camada, e passa a ser comum serem encontradas expressões como “camada de rolamento” e “camada de ligação” para descrever um revestimento dividido em duas camadas de diferentes materiais, por motivos técnicos, construtivos e de custo.

2.3 MATERIAIS PARA PAVIMENTAÇÃO

Segundo Senço (2007), os materiais mais utilizados no pavimento são os agregados e os materiais betuminosos, porém deve-se realizar um estudo profundo sobre as características de cada um, pelo fato de influenciar no desempenho das mesmas.

2.3.1 Agregados

São materiais granulares, sem configuração e dimensões definidas, que possuem características adequadas para constituir camadas ou misturas para a utilização em diversos tipos de obra (SENÇO, 2007).

De acordo com Bernucci *et al.* (2006), agregado é um nome dado para rochas minerais, areias e pedregulhos em seu estado natural ou britados. O desempenho das partículas do agregado está relacionado à maneira de como são produzidas e das condições em que vão atuar. Assim, é de grande importância a escolha do agregado, pois este deve apresentar características para suportar tensões aplicadas na superfície do pavimento, como também no seu interior.

2.3.1.1 Classificação quanto à natureza

Bernucci *et al.* (2006) afirma que os agregados, quanto à natureza, são classificados em: natural, artificial e reciclado. O natural é encontrado na natureza em formas convencionais, como na escavação e nas areias de rios, e podem ser utilizados conforme são extraídos da natureza ou podem passar pelo processo de britagem. Normalmente são originários de rochas que sofreram o processo de intemperismo. Os agregados artificiais são sobras dos processos industrializados, como a escória de alto forno, por exemplo. Já o agregado reciclado é oriundo da reutilização de diversos tipos de materiais. Essa prática vem crescendo e favorecendo, além da economia, os problemas ambientais de resíduos.

2.3.1.2 Classificação quanto ao tamanho

Para Bernucci *et al.* (2006), os agregados são classificados como:

- Graúdo: material com dimensões maiores que 2,0 mm, retido na peneira nº 10. São os seixos, britas, cascalhos, etc.

- Miúdo: são os agregados retidos na peneira nº 200, com dimensões superiores que 0,075 mm e inferiores a 2,0 mm. São as areias, o pó de pedra, etc.
- Material de enchimento (*filer*): material em que pelo menos 65% das partículas são inferiores a 0,075 mm e devem passar na peneira nº 200. São os cimentos Portland, a cal hidratada, etc.

2.3.1.3 Classificação quanto à distribuição

De acordo com Bernucci *et al.* (2006), quanto à distribuição e graduação dos agregados, são classificados em: densa, aberta, uniforme e descontínua.

- Densa: é aquele que apresenta distribuição granulométrica contínua de materiais bem graduados e chega próximo a densidade máxima.
- Aberta: apresenta curva granulométrica contínua e materiais bem graduados, porém faltam materiais finos para preencher os vazios entre as partículas maiores.
- Uniforme: apresenta a curva granulométrica íngreme e a maioria dos materiais com tamanhos estreitos.
- Descontínua: Apresenta variação no tamanho dos agregados, formando a curva granulométrica correspondente as frações intermediárias e necessitam ser trabalhados adequadamente, pois são sensíveis à segregação.

2.3.2 Materiais betuminosos

Betume é um material cimentício de aspecto sólido, semissólido ou viscoso, constituído principalmente de hidrocarbonetos solúveis em bissulfato de carbono e pode ser obtido por processos industriais ou encontrado na natureza. É dividido em asfalto e Alcatrão (ABNT NBR 7208/1990).

Asfalto é um material de cor escura, que possui o betume como constituinte principal, sendo encontrado na natureza ou derivado do petróleo (ABNT NBR 7208/1990).

Alcatrão é um produto betuminoso obtido através da destilação destrutiva da hulha, e sua cor varia de parda escura a preta (ABNT NBR 7208/1990).

De acordo com a mesma norma, as principais características dos materiais betuminosos são: força adesiva intensa, sensibilidade a temperatura, repelência a água e mau condutor de calor, som e eletricidade.

2.3.2.1 Cimento asfáltico

O cimento asfáltico pode ser denominado de cimento asfáltico de petróleo (CAP) ou cimento asfáltico natural (CAN). Ele é obtido através de processos de refinamento do petróleo cru, com a finalidade de atender as especificações para ser utilizado em pavimentos (BALBO, 2007).

2.3.2.2 Asfalto diluído

Segundo Senço (2007), é o asfalto diluído de um cimento asfáltico por derivados leves de petróleo, com a finalidade de diminuir provisoriamente a sua viscosidade, favorecendo sua aplicação.

2.3.2.3 Emulsão asfáltica

A emulsão asfáltica de petróleo (EAP) é uma mistura heterogênea de dois ou mais líquidos que não se misturam entre si, porém quando ocorre agitação forma uma mistura estável. Esta mistura possui propriedades químicas e estruturas moleculares que auxiliam na redução de tensão do asfalto com a água, por exemplo. A ruptura deve ser estável, sendo ela classificada em ruptura rápida (RR), ruptura média (RM) e ruptura lenta (RL) (PINTO, 2015).

2.4 CIMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO

De acordo com Senço (2007), os solventes inseridos aos cimentos asfálticos têm como objetivo proporcionar melhor trabalhabilidade dos aglutinantes, assim, usa-se cada vez mais os modificantes para elaborar misturas cimentícias de alta qualidade.

2.4.1 Polímeros para pavimentação

Segundo Balbo (2007), os tipos de polímeros para a pavimentação são: termofixos, termoplásticos, elastômeros e elastômeros termoplásticos.

- Termofixos: são aqueles que, submetidos ao calor, endurecem e não voltam ao estado normal.
- Termoplásticos: quando expostos ao calor amolecem e ao frio endurecem.

- Elastômeros: aqueles que ao receber calor decompõem-se antes de amolecer. Apresentam propriedades elásticas parecidas com as da borracha.
- Elastômeros termoplásticos: quando são aquecidos possuem propriedades termoplásticas e quando resfriados ficam elásticos.

2.4.2 Melhorias que o polímero emprega

Para Senço (2007), o grau de aperfeiçoamento que os polímeros oferecem depende das deficiências do ambiente onde vai ser aplicado, considerando variações térmicas, cargas mecânicas, se é uma obra nova ou reforma, etc.

Segundo o mesmo autor, os asfaltos modificados por polímeros apresentam melhorias como:

- Redução da constância de manutenção;
- Aumento da viscosidade;
- Aumento da vida útil de pavimentos em lugares de difícil acesso;
- Maior resistência ao envelhecimento e a deformação;
- Melhoria nas características adesivas e coesivas.

2.4.3 Asfalto modificado por adição de polímero SBS

Os CAP modificados tornam o material mais rígido ao receber esforços e mais moles ao aliviar os esforços. O polímero do tipo SBS (estireno-butadieno-estireno) é o mais utilizado ultimamente, pelo fato de possuir capacidade elástica, aumento da consistência e a viscosidade, tornando o revestimento de pavimento mais duradouro (BALBO, 2007).

2.4.4 Asfalto modificado por adição de pó de borracha triturada

Segundo Balbo (2007), as indústrias produtoras de borracha devem dar o destino final correto para as mesmas, e uma das opções é utilizar a borracha triturada no CAP, pois além de contribuir no desempenho do pavimento, minimiza os problemas ambientais. A borracha deve ter o diâmetro inferior a 2 mm e ser aquecida a uma temperatura de 200°C para ser incorporada ao CAP.

O asfalto modificado de borracha, comparado ao convencional, possui alto desempenho desenvolvido pelos valores de viscosidade, ponto de amolecimento e capacidade elástica. Além disso, aumenta a vida útil do pavimento, a aderência do pneu-pavimento e possui boa resistência ao envelhecimento, pelo fato da borracha fornecer ótimas propriedades físicas e químicas (PINTO, 2015).

2.5 MISTURA ASFÁLTICA

Compreende-se que combinações de granulometria e de ligantes especiais constituem misturas asfálticas a serem aplicadas como camadas estruturais de revestimento (SENÇO, 2007).

Sua produção é executada em usinas específicas, ou pode ser feito na própria pista para tratamentos superficiais. De acordo com o tipo do revestimento e do material ligante que será usufruído, possuem diversas formas de se obter a mistura, como misturas a frio, a quente, entre outras (BERNUCCI *et al.*, 2006).

2.5.1 Concreto asfáltico usinado a quente

O concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) é uma mistura proporcional de agregados de vários tamanhos e cimento asfáltico, no qual são aquecidos a uma temperatura, variando o tipo de material. A granulométrica correta para a composição do CBUQ necessita ser densa e a curva granulométrica deve ser contínua (BERNUCCI *et al.*, 2006)

2.5.2 Propriedades da mistura

De acordo com Balbo (2007), as misturas asfálticas retratam propriedades básicas para o pavimento, como:

- Estabilidade: resistência a deformidade permanente;
- Resiliência: possibilidade de guardar energia quando resignada pela carga;
- Durabilidade: resistente a desgaste fornecido pelas cargas do tráfego e ações climáticas.
- Resistência à fadiga: deforma devido ao carregamento constante e não rompe.

2.6 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Para dimensionar o pavimento flexível é necessário que a finalidade seja resistir aos esforços recebidos e resistir às ações climáticas, além de transmitir e distribuir as cargas recebidas. O início do dimensionamento ocorre quando são determinadas as espessuras das camadas e os materiais utilizados, e é escolhido o método a ser utilizado, sendo eles: método empírico, empírico-mecanístico e mecanístico. Para escolher o método leva-se em consideração o volume de tráfego, o tipo de solo e a vida útil do projeto (BALBO, 2007).

2.6.1 Método empírico

Segundo Senço (2007), os métodos empíricos são baseados em fórmulas, constantes e coeficientes resultantes de experimentos e averiguações, comparando soluções de cálculo com o desempenho no campo dos pavimentos.

2.6.2 Método empírico-mecanístico

O método empírico-mecanístico visa avaliar o comportamento estrutural das camadas do pavimento, conforme os parâmetros encontrados em ensaios ou as características dos materiais (BALBO, 2007).

De acordo com Senço (2007), o método empírico-mecanístico é feito através da utilização de fórmulas que consistem em determinar as tensões e deformações, visando evitar a deformação do solo.

2.6.3 Método mecanístico

Franco (2007) afirma que este método consiste na constatação da análise paramétrica por meio de softwares, podendo analisar as características físicas e mecânicas das camadas do pavimento.

2.7 DIMENSIONAMENTO DE CAMADA DE ROLAMENTO

Segundo Balbo (2007), é necessário saber o número de camadas para iniciar o dimensionamento, logo após é realizado o cálculo da primeira camada, denominada camada de rolamento, assim, seguindo gradativamente o dimensionamento.

2.7.1 Determinação da espessura da camada de rolamento

De acordo com o DNIT, a sua finalidade é proteger a camada de base dos esforços gerados pelas cargas e preservar o revestimento de uma ruptura por esforços repetitivos.

É realizada pelo método mecanístico, mediante software que analisa as características físicas e mecânicas das camadas de rolamento e examina se a espessura escolhida respeita as solicitações impostas pelas cargas do tráfego e pelas ações climáticas (FRANCO, 2007).

CAPÍTULO 3

3.1 METODOLOGIA

3.1.1 Caracterização da amostra

A determinação da espessura da camada de rolamento e as características mecânicas para o CBUQ com o CAP 50/70, CAP ECOFLEX AB-08 e CAP SBS 65/90 foram realizadas através do método mecanístico-empírico.

Foi executada uma comparação da redução da espessura do CBUQ com CAP 50/70, CAP SBS 65/90 e CAP ECOFLEX AB-8, a fim de afirmar se o CAP modificado por borracha possui maiores vantagens sobre o CAP convencional e o CAP modificado por polímero.

3.1.2 Faixa granulométrica de trabalho

A composição do CBUQ com o CAP 50/70 atendeu os requisitos da norma DNIT 031/2006 conforme tabela a seguir.

Tabela 1: Composição granulométrica faixa “C” DNIT 031/2006

Peneira de malha quadrada		% em massa, passando	
Série ASTM	Abertura(mm)	Faixa “C”	Tolerâncias
2”	50,8	-	-
1 ½”	38,1	-	7%□
1”	25,4	-	7%□
¾”	19,1	100	7%□
½”	12,7	80 - 100	7%□
3/8”	9,5	70 - 90	7%□
Nº 4	4,8	44 - 72	5%□
Nº 10	2,0	22 - 50	5%□
Nº 40	0,42	8 - 26	5%□
Nº 80	0,18	4 - 16	3%□
Nº 200	0,075	2 - 10	2%□

Fonte: DNIT (2006)

Para a composição do CBUQ com o CAP ECOFLEX AB-8, foi atendida a norma DNIT 112/09, que especifica parâmetros para o dimensionamento, apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Composição granulométrica faixa “C” DNIT-ES 112/09

Peneira de malha quadrada		% em massa, passando	
Série ASTM	Abertura (mm)	Faixa "C"	Tolerâncias
1 ½”	38,1	-	± 7%
1”	25,4	-	± 7%
¾”	19,1	100	± 7%
½”	12,7	80-100	± 7%
3/8”	9,5	70-90	± 7%
Nº 4	4,8	44-72	± 5%
Nº 10	2,0	22-50	± 5%
Nº 40	0,42	8-26	± 5%
Nº 80	0,18	4-16	± 3%
Nº 200	0,075	2-10	± 2%

Fonte: DNIT (2009)

Para a composição do CBUQ com o CAP SBS 65/90, utiliza-se a norma DNER-ES 386/99, conforme valores determinados na Tabela 3. Desta forma, foi adotada como referência a faixa C.

Tabela 3: Composição granulométrica faixa “C” DNER-ES 385/99

Peneira de malha quadrada		% em massa, passando	
Série ASTM	Abertura (mm)	Faixa "C"	Tolerâncias
1 ½”	38,1	-	± 7%
1”	25,4	-	± 7%
¾”	19,1	100	± 7%
½”	12,7	85-100	± 7%
3/8”	9,5	75-100	± 7%
Nº 4	4,8	50-85	± 5%
Nº 10	2,0	30-75	± 5%
Nº 40	0,42	15-40	± 5%
Nº 80	0,18	8-30	± 3%
Nº 200	0,075	5-10	± 2%

Fonte: DNIT (1999)

3.2 MATERIAIS

Os materiais utilizados para realizar a constituição do traço foram os seguintes (Tabela 4).

Tabela 4: Materiais para o traço

MATERIAL	QUANTIDADE
CAP:	100g
Agregado Graúdo:	
Brita ¾"	25 kg
Pedrisco	25 kg
Agregado Miúdo:	
Pó de pedra	50 kg

Fonte: Autor (2018).

Para cada dimensionamento foi utilizado o CAP 50/70, CAP SBS 65/90 e o CAP ECOFLEX AB-8. Eles foram fornecidos pelo distribuidor de asfalto.

Os agregados graúdos são divididos em brita e pedrisco e foram coletados em uma pedreira na cidade de Cascavel/PR, assim como o agregado miúdo e o pó de pedra. A cal foi coletada em uma loja de material para construção localizada na mesma cidade.

3.3 MÉTODO

3.3.1 Método *Marshall*

É especificado pelo DNIT 031/2006 que o traço para o CBUQ com o CAP 50/70 deve ser obtido pelo método *Marshall* (DNER-ME 043/95), assim como para o CBUQ com CAP ECOFLEX AB-8 e com CAP SBS 65/90, regidos pelas normas DNIT 112/09 e DNER-ES 385/99, respectivamente, também devem seguir o mesmo método.

Segundo o método *Marshall*, devem ser feitos no mínimo três corpos de prova para cada dosagem de mistura betuminosa. Para iniciar o procedimento foi adotado um teor para o CAP (T%) e a partir dele foi assegurado que a mistura estava dentro dos limites especificados pelas normas DNIT 031/2006, DNIT 112/09 e DNER-ES 385/99, assim foram analisadas novas misturas formadas pelas variações acima (T+0,5% e T+1,0%) e abaixo (T-0,5 e T-

1,0%) do adotado, com a finalidade de determinar o teor ótimo de material, sendo ele o teor que se enquadra em todos os limites.

Em seguida, foram moldados os corpos de prova e estabelecidos os parâmetros físicos e as características mecânicas para cada teor: massa específica aparente (g/cm^3), volume de vazios (%), vazios do agregado mineral (%) e relação betume/vazios (%). Com os ensaios determinou-se os parâmetros mecânicos: estabilidade e fluência.

Enfim, o teor ótimo da mistura foi determinado através das curvas elaboradas pelos resultados obtidos nos ensaios, sendo adotada aquela que ficou dentro dos limites definidos por norma.

3.3.1.1 Corpo de prova *Marshall*

De acordo com o DNER-ME 043/95, foram moldados três corpos de prova para o CAP ECOFLEX AB-8 e três corpos de prova para o CAP SBS 65/90, através da composição granulométrica e o teor de CAP determinados, respeitando os limites da faixa granulométrica de trabalho “C”.

Para realizar a mistura, os agregados foram colocados em estufa na temperatura máxima de 110°C , e separados de acordo com as suas dimensões, logo em seguida, foram colocados novamente na estufa e aquecidos à temperatura de aproximadamente 10 a 15°C acima da temperatura de aquecimento do CAP. Para o ligante ser misturado aos agregados deve ser aquecido a uma temperatura em que apresente uma viscosidade de 170 ± 20 cSt, sendo assim, o CAP foi aquecido até 142°C .

Utilizando a Equação 1 encontramos a quantidade de CAP para cada mistura.

$$\text{Quantidade de CAP} = \frac{M_{ag} \times Pa}{100 - Pa} \quad (1)$$

Onde:

M_{ag} : Massa dos agregados (g)

Pa : Teor do material ligante (%)

- CAP 50/70

M_{ag} : 1290g

Pa : 4,3%

$$Quantidade\ de\ CAP = \frac{1290g \times 4,3\%}{100 - 4,3\%} = 57,96\ g$$

- CAP ECOFLEX AB-8

M_{ag}:1332,2g

Pa:4,7%

$$Quantidade\ de\ CAP = \frac{1332,2g \times 4,7\%}{100 - 4,7\%} = 65,7\ g$$

- CAP SBS 65/90

M_{ag}:1338,5g

Pa: 4,5%

$$Quantidade\ de\ CAP = \frac{1338,5g \times 4,5\%}{100 - 4,5\%} = 63,07\ g$$

Posteriormente, os agregados foram misturados com o CAP, e a temperatura da mistura ficou entre 177°C, em seguida a mistura foi colocada sobre um papel-filtro, a fim da temperatura ficar aproximadamente a 157°C, sendo assim, a mistura foi colocada no molde de forma que ficasse com a menor quantidade de vazios possíveis, e o material com a superfície rente a borda do molde.

Em seguida, foi realizada a compactação da amostra com um soquete padrão de 78,5kg, lançado sobre a mesma com altura de queda livre de 45,72 cm, por 75 vezes na superfície superior e inferior do corpo de prova, logo após os corpos de prova ficaram em repouso por 12 horas, em temperatura ambiente.

Após o repouso os corpos de prova foram deformados e submetidos aos ensaios de resiliência e da resistência a tração por compressão diametral.

3.3.2 Módulo de Resiliência

Após os corpos de provas serem elaborados pelo método de *Marshall*, três deles foram utilizados para determinar o módulo de resiliência (MR), seguindo a norma DNIT-ME

135/2010, que o descreve como sendo a relação entre a tensão de tração e a deformação específica recuperável correspondente à tensão aplicada.

O módulo de resiliência é determinado através de ensaios, iniciando pela prensa pneumática, onde o corpo de prova foi posicionado na horizontal, com a temperatura de $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, conforme especificada em norma. Na prensa foi colocado um temporizador eletrônico, que tem como função controlar o tempo e a frequência de aplicação da carga vertical. No corpo de prova, foi fixado um sistema que mede a deformação do mesmo, assim, quando a carga foi aplicada constantemente gerou uma tensão de tração, possibilitando medir a deformação recuperável correspondente a tensão gerada. Com os valores obtidos determinou-se a deformação elástica do corpo de prova. O módulo de resiliência é calculado através da Equação 2.

$$MR = \frac{F}{\Delta \cdot H} \cdot (0,9976\mu + 0,2692) \quad (2)$$

Onde:

MR: Módulo de resiliência (kgf/cm^2)

F: Carga vertical repetida (Kgf)

Δ : Deformação elástica registrada (cm)

H: Altura do corpo de prova (cm)

3.3.3 Resistência a tração

Para a realização do ensaio de resistência a tração (RT), foram utilizados três corpos de prova, conforme a norma DNIT-ME 136/2010. O ensaio iniciou-se com a determinação da altura e diâmetro do corpo de prova, e a verificação da temperatura do mesmo, que de acordo com a norma deve ser de $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Posteriormente, o corpo de prova foi colocado sobre a prensa e aplicou-se o carregamento até sua ruptura. Sendo assim, com o valor da carga de ruptura obtido, é usada a Equação 3 para calcular a resistência a tração.

$$\sigma_R = \frac{2F}{\pi DH} \quad (3)$$

Onde:

σ_R : Resistência a tração (kgf/cm²)

F: Carga de ruptura (kgf)

D: Diâmetro do corpo de prova (cm)

H: Altura do corpo de prova (cm)

3.3.4 Dimensionamento

Para realizar o dimensionamento da camada de rolamento de pavimento flexível foi utilizado o *software* SisPav, que tem como função realizar o dimensionamento da estrutura do pavimento através do método mecanístico-empírico em múltiplas camadas. Foi levado em consideração o período do projeto, volume de tráfego, o clima, os materiais utilizados e o módulo de resiliência. O dimensionamento foi realizado para o CBUQ com o CAP convencional, CAP modificado por polímero e com o CAP modificado por borracha.

3.3.4.1 Condição climática

Com as informações do clima, o algoritmo do SisPav consegue conjugar os efeitos de envelhecimento da mistura asfáltica com o impacto da variação mensal dos carregamentos sobre a vida de projeto e o acúmulo de danos na estrutura, sendo assim, foi utilizado as condições padrões estabelecidas pelo *software*, tendo o mês de janeiro como abertura de tráfego na região de Curitiba.

3.3.4.2 Volume de tráfego

No SisPav foi considerado o volume médio de tráfego, dessa forma, de acordo com o DNIT foi utilizado o carregamento de 5×10^6 considerando aplicação de eixo padrão.

3.3.4.3 Estrutura do pavimento

Para a estrutura do pavimento, foi utilizada a modelagem padrão do *software*, sendo o subleito de solo siltoso, a sub-base de material granular e a base de brita graduada simples, conforme tabela 5.

Tabela 5: Estrutura tipo pavimento

Estrutura Pavimento Analisado						
Camada de Material		Espessura CAP 50/70	Espessura CAP ECOFLEX AB-8	Espessura CAP SBS 65/90	Módulo Resiliência (Mr)	Coefficiente Poisson
	CBUQ	Dimensionar	Dimensionar	Dimensionar	-	0,33
	Brita Graduada Com Cimento	20 cm	25 cm	25 cm	5000 Mpa	0,25
	Material Granular	20 cm	30 cm	30 cm	350 Mpa	0,35
	Subleito	Não considera	Não considera	Não considera	189 Mpa	0,35

Fonte: Autor (2018)

Sendo assim, os dados da tabela foram lançados no software com o propósito de finalizar o dimensionamento da espessura da camada de rolamento para o CAP convencional, para o CAP modificado com polímero e para o CAP modificado com borracha.

3.3.5 Análise dos dados

A análise dos dados foram feitas a partir dos resultados obtidos pelo *software* SisPav, sendo verificado se houve redução das espessuras das camadas de rolamento e considerando suas possíveis diferenças mediante gráficos e tabelas.

CAPÍTULO 4

4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As normas especificam as características que os materiais devem apresentar na mistura, conforme a faixa C. Essas características influenciam no dimensionamento do pavimento e na análise, pois nesse momento é possível verificar se está de acordo com os limites especificados pela norma.

Para o CAP 50/70 os limites estão de acordo com a norma DNIT 031/2006 – ES: o CAP ECOFLEX AB-8 segue a norma DNIT 112/2009 – ES e o CAP SBS 65/90 utiliza a norma DNER-ES 385/99.

4.1.1 Caracterização mecânica dos agregados

A caracterização dos agregados foi fornecida pela construtora A (ANEXO A). De acordo com a Tabela 6, os materiais atendem aos limites estipulados em cada especificação.

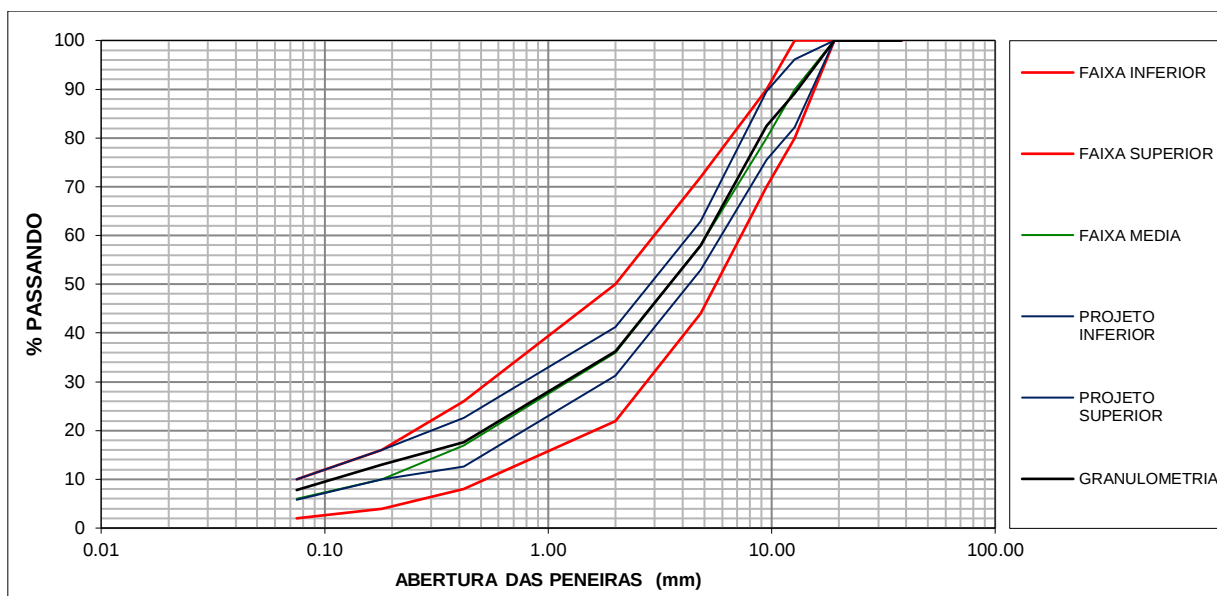
Tabela 6: Característica dos agregados

Características	Aplica-se Agregado	Norma de Referência	Und.	Limites da ES			Resultado
				031/06	385/99	112/09	
Abrasão <i>Los Angeles</i>	Graúdo	DNER-ME 035/98	%	≤ 50	≤ 50	≤ 50	15,2
Índice de forma	Graúdo	DNER-ME 086/94	%	> 0,5	> 0,5	> 0,5	0,78
Durabilidade (perda)	Graúdo	DNER-ME 089/94	%	< 12	< 12	< 12	4
Equivalência de areia	Miúdo	DNER-ME 054/94	%	≥ 55	≥ 55	≥ 55	64,79

Fonte: Autor (2018)

4.1.2 Composição granulométrica

A construtora B forneceu a composição granulométrica para as misturas em CBUQ. Todos os CAP seguiram o mesmo padrão de traço, fazendo apenas uma substituição direta entre os tipos de CAP. O Gráfico 1 apresenta a curva granulométrica do CAP 50/70 e os limites conforme a especificação DNIT 031/2006, assim demonstrando que as misturas fornecidas estão de acordo com os limites e atendem a norma.

Gráfico 1: Curva Granulométrica Faixa “C” CAP 50/70

Fonte: Autor (2018)

4.1.2.1 Índice de vazios

De acordo com ABEDA (2010), o índice de vazios proporciona baixa permeabilidade à água e ao ar, aumentando a durabilidade do material. Além disso, ele influencia no excelente comportamento estrutural e funcional das vias.

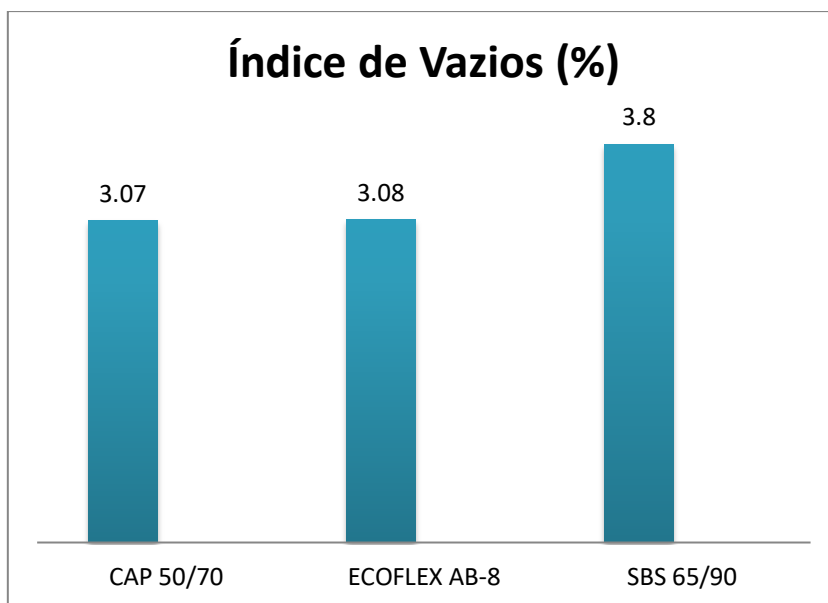
Na Tabela 7 são especificados os limites de acordo com as respectivas normas de cada CAP para o índice de vazios.

Tabela 7: Limite do índice de vazios

CAP	Norma de referência	Und.	Limite das ES
CAP 50/70	DNER-ME 043/95	%	3 a 5
CAP ECOFLEX AB-8	DNER-ME 043/95	%	3 a 5
CAP SBS 65/90	DNER-ME 043/95	%	3 a 5

Fonte: Autor (2018)

O Gráfico 2 apresenta os resultados das amostras e as diferenças entre cada tipo de CAP utilizado.

Gráfico 2: Resultado do índice de vazios.

Fonte: Autor (2018)

É possível analisar que todos os resultados estão dentro dos limites das normas específicas para cada material, porém o CAP 50/70 e o CAP ECOFLEX AB-8 estão próximos do limite inferior da norma, então pode ser feito um novo dimensionamento para que esses valores não fiquem tão perto do limite.

4.1.2.2 Relação betume/vazios

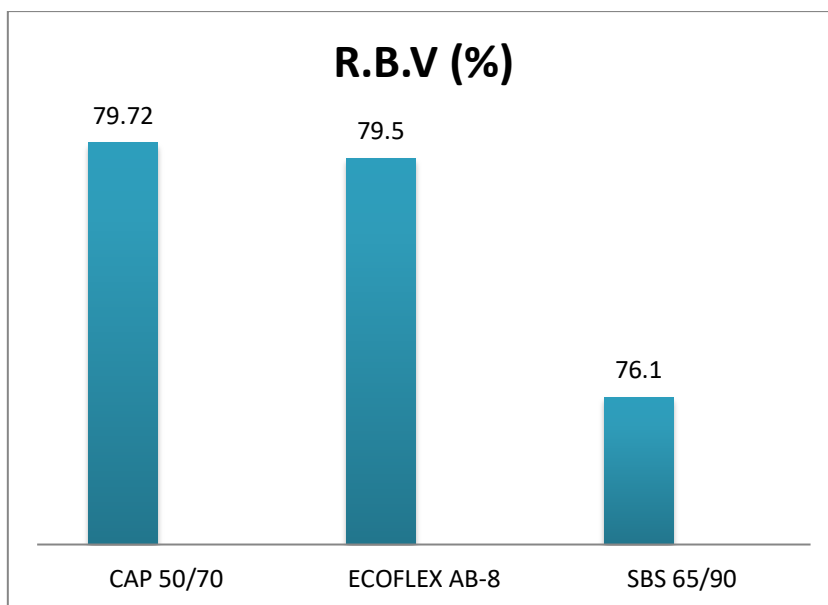
A relação betume/vazios (R.B.V) determina a proporção de betume dentro dos vazios que são deixados pelos agregados. Para analisar se está correta, a Tabela 8 especifica os limites de acordo com as respectivas normas de cada CAP para a relação betume/vazios.

Tabela 8: Limite da relação betume/vazios

CAP	Norma de referência	Und.	Limite das ES
CAP 50/70	DNER-ME 043/95	%	75 a 82
CAP ECOFLEX AB-8	DNER-ME 043/95	%	70 a 82
CAP SBS 65/90	DNER-ME 043/95	%	70 a 82

Fonte: Autor (2018)

O Gráfico 3 retrata os resultados obtidos através do ensaio. Através dele pode-se constatar as diferenças entre os CAP utilizados.

Gráfico 3: Resultado da relação betume/vazios

Fonte: Autor (2018)

De acordo com os resultados, a relação betume e vazios está dentro do limite para todos os CAP, atendendo a especificação do DNIT.

4.1.2.3 Estabilidade mínima

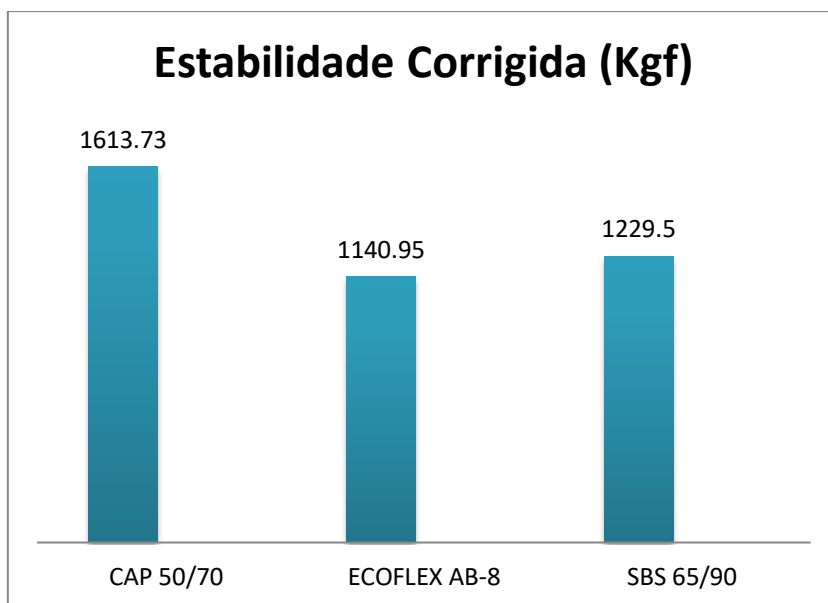
Segundo Bernucci *et al.* (2006), a estabilidade é a carga máxima que o corpo de prova suporta antes da ruptura. Na Tabela 9 são estabelecidos os limites de acordo com as respectivas normas de cada CAP para a estabilidade mínima.

Tabela 9: Limite da estabilidade mínima

CAP	Norma de referência	Und.	Limite mínimo das ES
CAP 50/70	DNER-ME 043/95	Kgf	500
CAP ECOFLEX AB-8	DNER-ME 043/95	Kgf	800
CAP SBS 65/90	DNER-ME 043/95	Kgf	800

Fonte: Autor (2018)

O Gráfico 4 apresenta os resultados obtidos através do ensaio.

Gráfico 4: Resultado da estabilidade mínima

Fonte: Autor (2018)

Conforme os resultados é certificado que todos os CAP estão de acordo com os limites.

4.1.2.4 Fluência

A fluência é a deformação total do corpo de prova ocorrido na vertical, causado pela aplicação da carga máxima no mesmo. Para ter uma boa fluência, deve-se certificar-se que o volume de vazios com ar esteja na proporção correta. Caso não esteja correta, as misturas asfálticas param de ser estáveis ao tráfego e, por fluência, são deformadas expressivamente.

A Tabela 10 fornece os limites de fluência de cada norma para seus respectivos CAP.

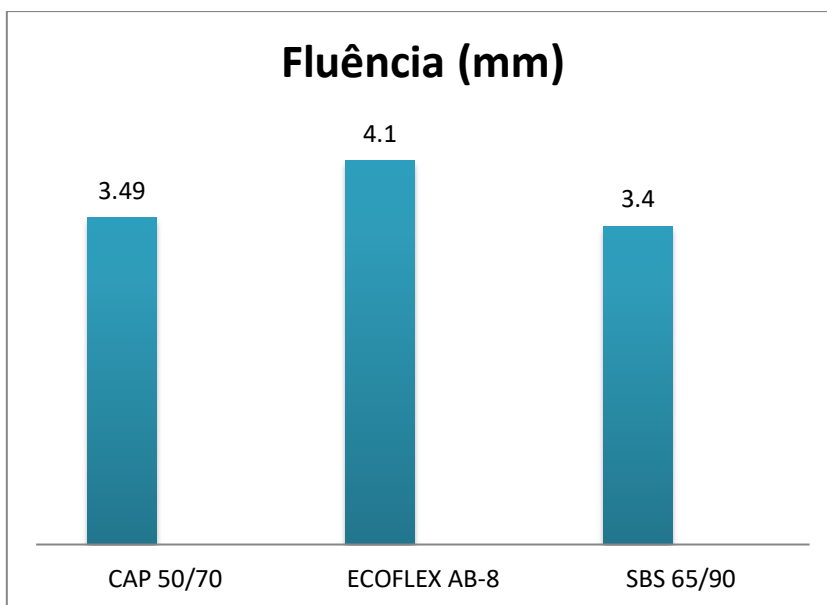
Tabela 10: Limite de fluência

CAP	Norma de referência	Und.	Limite das ES
CAP 50/70	DNER-ME 043/95	mm	2 a 4,5
CAP ECOFLEX AB-8	DNER-ME 043/95	mm	2 a 4,5
CAP SBS 65/90	DNER-ME 043/95	mm	2 a 4,5

Fonte: Autor (2018)

O Gráfico 5 apresenta os resultados adquiridos através do ensaio.

Gráfico 5: Resultado da fluência

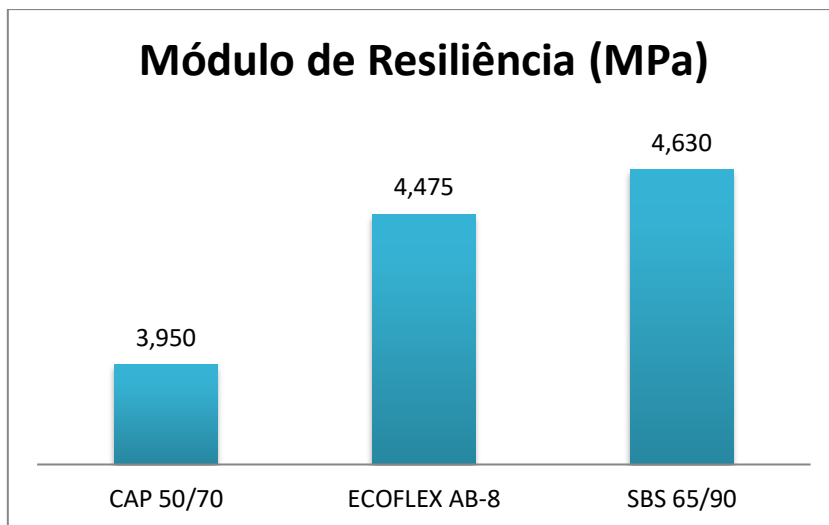


Fonte: Autor (2018)

De acordo com o gráfico, os resultados obtidos estão de acordo com os limites, atendendo as especificações do DNIT.

4.1.3 Módulo de Resiliência

Os valores do módulo de resiliência obtidos através dos ensaios são apresentados no Gráfico 6 e foram utilizados 9 corpos de prova para a realização do ensaio, sendo 3 de cada CAP.

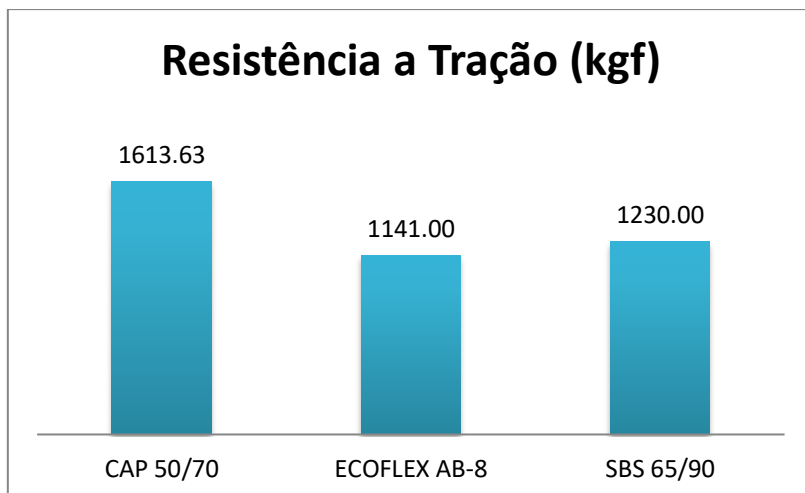
Gráfico 6: Resultado do módulo de resiliência

Fonte: Autor (2018)

É possível analisar a diferença entre os tipos de CAP, principalmente em relação ao CAP 50/70 com os modificados, sendo que os resultados obtidos através da utilização dos diferentes tipos de CAP foi que o CAP ECOFLEX AB-8 apresentou 13,29% acima do CAP 50/70 e o CAP SBS 65/90 expressou ser 17,21% acima do mesmo. A diferença entre os CAP modificados foi de 3,46%, sendo o CAP SBS 65/90 apresentou maior valor do módulo de resiliência.

4.1.5 Resistência a tração

O resultado da resistência a tração das misturas foi obtido através do ensaio de resistência a tração por compressão diametral e foi utilizado 9 corpos de prova para a realização deste ensaio, sendo 3 de cada CAP. Os valores estão representados no Gráfico 7.

Gráfico 7: Resultado da resistência a tração

Fonte: Autor (2018)

O CAP 50/70 obteve o maior valor em relação aos outros, sendo que a diferença entre ele e o CAP ECOFLEX AB-8 é de 41,42% e em relação ao CAP SBS 65/90 é de 31,19%. A diferença entre os CAP modificados é de 7,8%, sendo o CAP SBS 65/90 com o maior valor entre os dois. Os resultados estão de acordo com o DNIT.

4.1.6 Dimensionamento

Comparou-se a espessura da camada de rolamento em CBUQ com os três tipos de CAP, convencional (CAP 50/70), modificado por borracha (ECOFLEX AB-8) e o modificado por polímero (SBS 65/90). Dessa forma, para realizar o dimensionamento foram utilizados valores padrão para o carregamento, clima e a estrutura do pavimento, alterando apenas o valor do módulo de resiliência.

Para o dimensionamento da camada de rolamento em CBUQ foram utilizados os seguintes valores de MR para cada CAP: para o CAP convencional o valor do MR é 3.950 MPa (Figura 2); o CAP modificado com borracha utilizou o valor de 4.475 MPa (Figura 3); e para o CAP modificado por polímero aplicou-se o valor de 4.630 MPa (Figura 4).

Figura 2: Dimensionamento CBUQ CAP 50/70

Projeto: NÍVEL DE PROJETO << A >>

Alterar Estrutura >>

CAMADA	MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	Misturas CAP 50/70	14,2	3950	0,33
2	BRITA GRADUADA COM CIMENTO (BGTC)	Projeto	30	5000	0,25
3	MATERIAL GRANULAR	Projeto	30	350	0,35
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS'	0,0	189	0,35

Seção do pavimento dimensionada considerando os dados inseridos no SisPavBR.
 Dano Crítico no Pavimento: 101,89% com confiabilidade de 85%
 Tipo: Fadiga de Misturas Asfálticas na Camada: 1
 Vida de projeto estimada em 9,8 ano(s)
 Flow Number das misturas asfálticas > 300 cidos

Projeto novo NÍVEL <A>

Fonte: Autor (2018)

Figura 3: Dimensionamento CBUQ CAP ECOFLEX AB-8

Projeto: NÍVEL DE PROJETO << A >>

Alterar Estrutura >>

CAMADA	MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	Misturas CAP 50/70	17,1	4475	0,33
2	BRITA GRADUADA COM CIMENTO (BGTC)	Projeto	25	5000	0,25
3	MATERIAL GRANULAR	Projeto	30	350	0,35
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS'	0,0	189	0,35

Seção do pavimento dimensionada considerando os dados inseridos no SisPavBR.
 Dano Crítico no Pavimento: 98,20% com confiabilidade de 85%
 Tipo: Fadiga de Misturas Asfálticas na Camada: 1
 Vida de projeto estimada em 10,2 ano(s)
 Flow Number das misturas asfálticas > 300 cidos

Projeto novo NÍVEL <A>

Fonte: Autor (2018)

Figura 4: Dimensionamento CBUQ CAP SBS 65/90

Projeto: NÍVEL DE PROJETO << A >>

Alterar Estrutura >>

CAMADA	MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	Misturas CAP 50/70	15,6	4630	0,33
2	BRITA GRADUADA COM CIMENTO (BGTC)	Projeto	25	5000	0,25
3	MATERIAL GRANULAR	Projeto	30	350	0,35
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS'	0,0	189	0,35

Seção do pavimento dimensionada considerando os dados inseridos no SisPavBR.
 Dano Crítico no Pavimento: 100,72% com confiabilidade de 85%
 Tipo: Fadiga de Misturas Asfálticas na Camada: 1
 Vida de projeto estimada em 9,9 ano(s)
 Flow Number das misturas asfálticas > 300 ciclos

Projeto novo NÍVEL <A>

Fonte: Autor (2018)

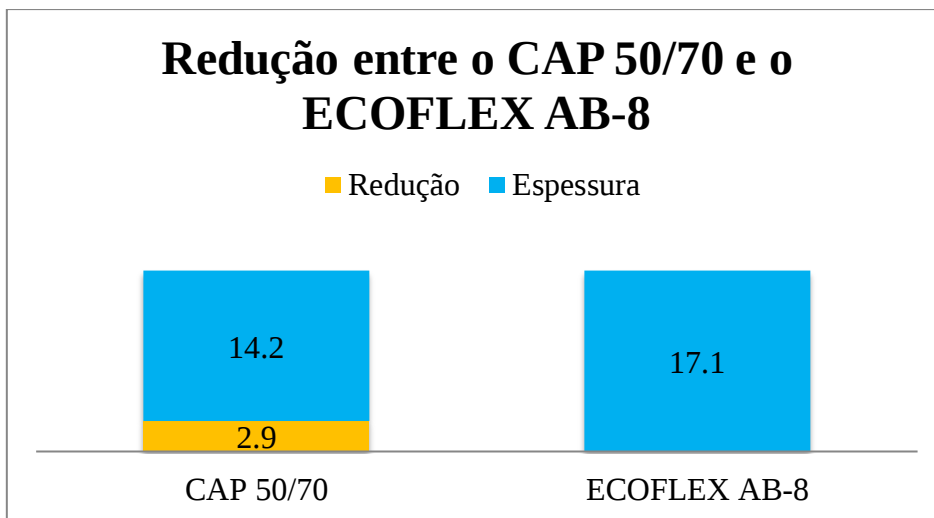
De acordo com o resultado do dimensionamento, o CAP 50/70 necessita de uma camada de 14,2 cm de CBUQ para suportar o carregamento, para o CAP ECOFLEX AB-8 é necessário 17,1 cm para a camada e o CAP SBS 65/90 precisa de 15,6 cm. A Tabela 11 apresenta a diferença entre o CAP convencional e o CAP modificado com borracha e o Gráfico 8 representa da melhor maneira estes resultados, a Tabela 12 apresenta a diferença entre o CAP convencional e o CAP modificado com polímero e o Gráfico 9 expressa esta diferença e a Tabela 13 apresenta a diferença entre os CAP modificados, assim como o Gráfico 10 apresenta suas diferenças como os anteriores.

Tabela 11: Comparação das espessuras do CAP 50/70 e o CAP ECOFLEX AB-8

CBUQ	CAP 50/70	CAP ECOFLEX AB-8
Espessura	14,2	17,1
Redução	2,9 cm	
	20,42%	

Fonte: Autor (2018)

Gráfico 8: Comparação das espessuras do CAP 50/70 e o CAP ECOFLEX AB-8 e a redução.



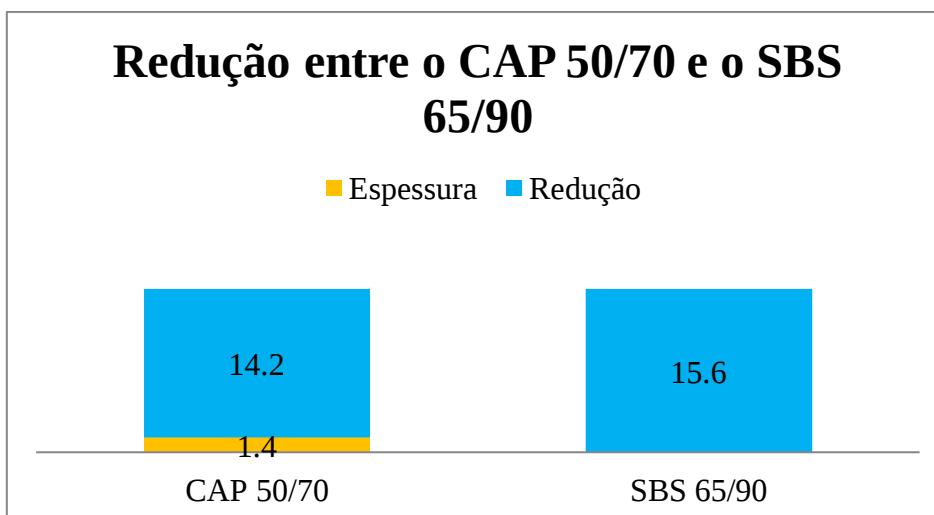
Fonte: Autor (2018)

Tabela 12: Comparação das espessuras do CAP 50/70 e o CAP SBS 65/90

CBUQ	CAP 50/70	CAP SBS 65/90
Espessura	14,2	15,6
Redução	1,4 cm	
	9,86%	

Fonte: Autor (2018)

Gráfico 9: Comparação das espessuras do CAP 50/70 e o CAP SBS 65/90 e a redução.

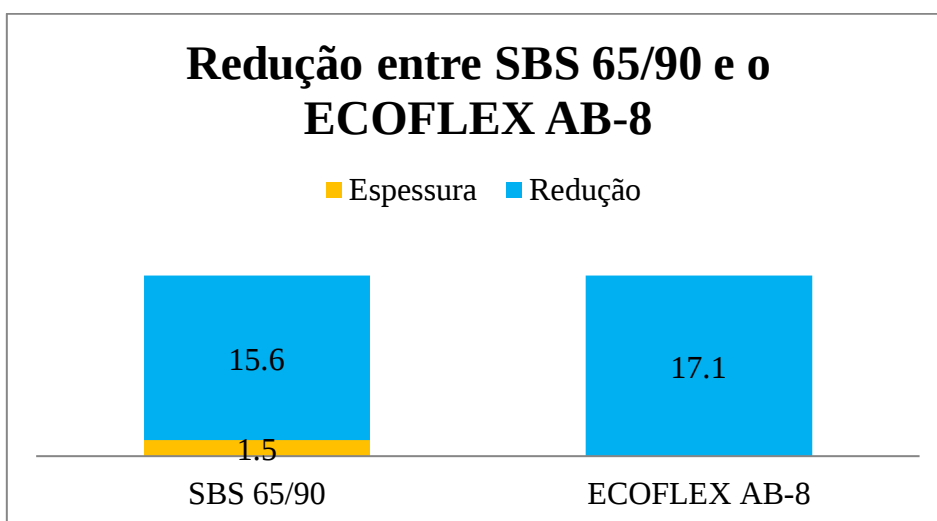


Fonte: Autor (2018)

Tabela 13: Comparação das espessuras do CAP ECOFLEX AB-8 e o CAP SBS 65/90

CBUQ	CAP ECOFLEX AB-8	CAP SBS 65/90
Espessura	17,1	15,6
Redução	1,5 cm	
	9,61%	

Fonte: Autor (2018)

Gráfico 10: Comparação das espessuras do CAP ECOFLEX AB-8 e o CAP SBS 65/90 e a redução.

Fonte: Autor (2018)

Nesta análise verificou-se que não houve redução na camada de CAP em relação ao CAP convencional comparando com os tipos de CAP modificados, porém, a camada dois composta por brita graduada com cimento (BGTC), reduziu 5 cm utilizando os CAP modificados, assim, explicando a ausência da redução da camada de CAP utilizando o CAP ECOFLEX AB-8 e CAP SBS 65/90 em relação ao CAP 50/70. Vale ressaltar que o *software* não avalia as propriedades do CBUQ, o dimensionamento é realizado analisando somente a estrutura do pavimento.

CAPÍTULO 5

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando o estudo realizado foi possível comparar as características dos diferentes CAPs, como a redução da espessura, o módulo de resiliência e a resistência à tração, sendo que estas características são de suma importância para avaliar como cada mistura pode se comportar ao ser utilizada em uma via.

Foi utilizado o método mecânico-empírico para realizar o dimensionamento dos CAPs: CAP convencional (50/70), CAP modificado por borracha (ECOFLEX AB-8) e o CAP modificado por polímero (SBS 65/90). Para a realização de todo o processo foi assegurado que o dimensionamento estava de acordo com os limites da faixa “C” especificada pelas normas do DNIT.

Os corpos de prova foram moldados através do método *Marshall* (DNER-ME 043/95) assim como a composição das amostras. Os resultados obtidos neste método foram utilizados para o dimensionamento da camada de rolamento em CBUQ para cada tipo de CAP.

A comparação do módulo de resiliência entre os três tipos de CAP apontou uma diferença mínima entre os CAP modificados, que foi de 3,46%, sendo que o CAP SBS 65/90 apresentou o maior valor, não somente comparado ao modificado, como também comparado ao convencional, que foi de 4.630 MPa. O CAP 50/70 obteve o menor resultado entre os três, 3.950 MPa, com a diferença de 13,29% relacionado ao CAP ECOFLEX AB-8, que alcançou o valor de 4.475 MPa e com relação ao CAP SBS 65/90, 17,21% acima do CAP convencional. Apesar da pequena diferença entre os modificados, o CAP SBS 65/90 apresentou melhor comportamento, dispondo de melhor característica elástica do material ligante, melhor resistência a patologias que podem surgir na via decorrente do fluxo de veículos e também maior vida de fadiga.

Analisando os valores obtidos no ensaio de resistência a tração por compressão diametral, o CAP convencional obteve o melhor valor comparando os três, possuindo uma diferença de 41,42% em relação ao CAP ECOFLEX AB-8 e 31,19% acima do CAP SBS 65/90. A diferença entre os CAP modificados é pequena, resultando em apenas 7,8% a mais para o CAP SBS 65/90. De acordo com as bibliografias consultadas, os CAP modificados devem apresentar melhor resistência à tração do que o CAP convencional, pelo fato de possuir melhor recuperação elástica do ligante. Portanto, este ensaio pode ter sofrido algum erro,

porém, como o resultado de resistência a tração não é utilizado no dimensionamento do pavimento, não foi necessário refazer o ensaio.

A comparação das espessuras de cada CAP resultadas através dimensionamento realizado para cada estrutura. O CAP 50/70 resultou em uma redução de 20,42% em relação ao CAP ECOFLEX AB-8, a mesma comparação é feita com o CAP 50/70 e o CAP SBS 65/90, resultando em uma redução de 9,86% para o CAP convencional. A diferença entre os CAP modificados é de 9,61%, reduzindo a camada do CAP SBS 65/90. Pode-se analisar que o CAP convencional obteve redução na camada em relação aos CAP modificados, que de acordo com as bibliografias consultadas, os CAP modificados apresentam maior resistência a esforços, maior distribuição de esforços, maior flexibilidade e a capacidade de se deformar quando é submetido a uma carga e retornar ao seu estado inicial após o carregamento, assim, deveriam reduzir sua espessura quando comparados ao CAP convencional. Porém, é analisado que a segunda camada do dimensionamento não foi à mesma para os CAP, sendo que o CAP ECOFLEX AB-8 e o CAP SBS 65/90 obteve uma redução de 5 cm em relação ao CAP 50/70, está redução ocorreu porque ao realizar o dimensionamento dos CAP modificados, inicialmente foi utilizado o valor de 30 cm na segunda camada, porém, ao analisar o pavimento o *software* emitiu um aviso que não permitiu a utilização deste valor, pelo fato da espessura de CAP ficar abaixo do limite, então, foi feita a alteração para 25 cm e assim, o dimensionamento foi realizado. Portanto, é justificável a falta de redução na camada 1 utilizando os CAP modificados.

A redução da espessura entre os CAP ECOFLEX AB-8 e o CAP SBS 65/90 foi maior do que era previsto, pelo fato de tratar de dois CAP modificados, que melhoram a durabilidade do revestimento, assim aumentando sua vida útil, também, tornando-as mais resistente a patologias na pista, gerando uma via mais segura para os usuários. Porém, possuem as mesmas vantagens sobre o CAP convencional, que além das melhores características, também colaboram com o meio ambiente reutilizando os materiais.

Em última análise, sem considerar os custos, é possível verificar que o CAP SBS 65/90 possui vantagens comparadas aos outros CAP, obtendo o valor MR superior aos demais, assim como o RT, sendo que neste ensaio indicou que o valor do CAP 50/70 está errado. Também, o dimensionamento do pavimento utilizando o CAP SBS 65/90 demonstrou-se ser mais vantajoso.

Concluiu-se, por fim que, utilizando os CAP modificados, obtém uma melhora nas características mecânicas e é possível reduzir a espessura da camada de brita graduada com cimento, viabilizando na utilização em campo.

CAPÍTULO 6

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De acordo com os resultados obtidos neste estudo, é recomendado os seguintes trabalhos que podem ser realizados:

- Realizar o mesmo estudo, utilizando diferentes CAP, tanto para o convencional quanto para os modificados;
- Realizar uma comparação em relação ao custo benefício de cada CAP, considerando produção e execução;
- Comparar como cada CAP se comporta em campo;
- Verificar se a Acréscimo da vida útil do pavimento utilizando os CAP modificados.

REFERÊNCIAS

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação Asfáltica**: materiais, projetos e restauração. Oficina de Textos, São Paulo, 2007.

BERNUCCI, L. Bet al. **Pavimentação Asfáltica**: Formação Básica para Engenheiros, Adeba, Rio de Janeiro, 2008.

Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. **Manual de pavimentação**, 3. ed., Rio de Janeiro, 2006.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Misturas Betuminosas a quente, Ensaio Marshall** – Método de Ensaio. DNER-ME 043/95., Rio de Janeiro, 1995.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Pavimentação** - concreto asfáltico com asfalto polímero – Especificação de serviço. DNER-ES 385/99. Rio de Janeiro, 1999.

Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. **Pavimentos flexíveis** - Concreto asfáltico - Especificação de serviço. DNIT - ES 031/2004. Rio de Janeiro, 2004.

Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. **Pavimentos flexíveis** – Concreto asfáltico com asfaltoborracha, via úmida, do tipo “Terminal Blending” - Especificação de serviço. DNIT 112/2009 – ES. Rio de Janeiro, 2009.

Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. **Pavimentação Asfáltica** - Misturas Asfálticas - Determinação do Módulo de Resiliência – Método de Ensaio. DNIT 135/2010 – ME. Rio de Janeiro, 2010.

Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. **Pavimentação Asfáltica** - Misturas Asfálticas - Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral – Método de Ensaio. DNIT 136/2010 – ME. Rio de Janeiro, 2010.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos asfálticos** – SisPav. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro, 2007.

MEDINA, Jacques; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 3 ed., Interciência, Rio de Janeiro, 2015

METZ, D. **Comparativo dos resultados da redução das espessuras de camadas de rolamento de pavimentos flexíveis em CBUQ pela substituição do CAP SBS 65/90 e ECOFLEX AB-8**. 2017. 77 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil)-Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz, Cascavel, 2017.

PINTO, Salomão; PINTO, Isaac Eduardo. **Pavimentação Asfáltica** – Conceitos Fundamentais sobre Materiais e Revestimentos Asfálticos. LTC – Livros Técnicos Científicos Editora Ltda., Rio de Janeiro, 2015.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. Volume 1.2 ed, Pini, São Paulo, 2007.

Confederação Nacional de Transporte. **Somente 12,4% da malha rodoviária brasileira é pavimentada.** Disponível em<<http://www.cnt.org.br/imprensa/noticia/somente-12-da-malha-rodoviaria-brasileira-pavimentada>> Acesso em: 29 out. 2018.

CERATTI, J. A.P. **Utilização de ligantes asfálticos em serviços de pavimentação.** 1ed, Rio de Janeiro, 2015.

ABEDA. **Manual básico de emulsões alfálticas.** 2ed, Rio de Janeiro, 2010.

ANEXO A - GRANULOMETRIA DOS AGREGADOS E DOSAGEM DA MISTURA

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA (DNIT ES 031/2006)													
PENEIRAS		AG. GRAÚDO		AG. MEDIO		AG. GRAÚDO		AG. MIÚDO		AG. MIÚDO		MAT. ENCHIM.	
		BRITA 3/4"		PEDRISCO 3/8"		BRITA 3/4"		PÓ DE PEDRA		PÓ DE PEDRA		FILLER	
POL.	mm	GRAN.	% MIST.	GRAN.	% MIST.	GRAN.	% MIST.	GRAN.	% MIST.	GRAN.	% MIST.	GRAN.	% MIST.
		% PASS.	0,00	% PASS.	25,00	% PASS.	25,00	% PASS.	10,00	% PASS.	40,00	% PASS.	0,00
1 1/2"	38,10	100,00	0,00	100,00	25,00	100,00	25,00	100,00	10,00	100,00	40,00	0,00	0,00
1"	25,40	100,00	0,00	100,00	25,00	100,00	25,00	100,00	10,00	100,00	40,00	0,00	0,00
3/4"	19,10	100,00	0,00	100,00	25,00	100,00	25,00	100,00	10,00	100,00	40,00	0,00	0,00
1/2"	12,70	56,63	0,00	100,00	25,00	56,63	14,16	100,00	10,00	100,00	40,00	0,00	0,00
3/8"	9,50	29,96	0,00	100,00	25,00	29,96	7,49	100,00	10,00	100,00	40,00	0,00	0,00
Nº 4	4,80	3,24	0,00	30,39	7,60	3,24	0,81	99,08	9,91	99,08	39,63	0,00	0,00
Nº 10	2,00	1,88	0,00	4,42	1,11	1,88	0,47	69,44	6,94	69,44	27,78	0,00	0,00
Nº 40	0,42	1,78	0,00	1,63	0,41	1,78	0,45	33,49	3,35	33,49	13,40	0,00	0,00
Nº 80	0,18	1,65	0,00	1,10	0,28	1,65	0,41	24,57	2,46	24,57	9,83	0,00	0,00
Nº 200	0,08	0,32	0,00	0,77	0,19	0,32	0,08	15,06	1,51	15,06	6,02	0,00	0,00

MISTURA GRANULOMÉTRIA ELEITA							
PENEIRAS		SOMA TOTAL DOS PERCENTUAIS ELEITOS DE CADA AGREGADO	FAIXA DE PROJETO		DNIT ES 031/2006		
POL.	mm				FAIXA - C		
			MIN.	MAX	MIN.	MAX.	MÉDIA
1 1/2"	38,1	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1 "	25,4	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,1	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,7	89,16	82,16	96,16	80,00	100,00	90,00
3/8"	9,5	82,49	75,49	89,49	70,00	90,00	80,00
Nº 4	4,8	57,95	52,95	62,95	44,00	72,00	58,00
Nº 10	2	36,29	31,29	41,29	22,00	50,00	36,00
Nº 40	0,42	17,60	12,60	22,60	8,00	26,00	17,00
Nº 80	0,18	12,97	9,97	16,00	4,00	16,00	10,00
Nº 200	0,08	7,80	5,80	10,00	2,00	10,00	6,00
TEOR PROVÁVEL DE CAP (%)							