

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ
DARÍLIA METZ

**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**

CASCATEL - PR

2017

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ

DARÍLIA METZ

**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**

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

Professor Orientador: Engenheiro Civil Esp. Lincoln Salgado.

CASCADEL - PR

2017

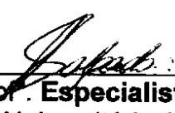
CENTRO UNIVERSITÁRIO FAG

DARÍLIA METZ

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

Trabalho apresentado no Curso de Engenharia Civil, do Centro Universitário Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, sob orientação do Professor (a) **Especialista Engenheiro Civil LINCOLN SALGADO**.

BANCA EXAMINADORA


Orientador (a) Prof. **Especialista LINCOLN SALGADO**
Centro Universitário Assis Gurgacz
Engenheiro Civil


Professor (a) **Mestre ANDREA RESENDE SOUZA**
Centro Universitário Assis Gurgacz
Engenheira Civil


Professor (a) **Mestre JULIO TOZO NETO**
Centro Universitário Assis Gurgacz
Engenheiro Civil

Cascavel, 22 de Junho de 2017.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter iluminado o meu caminho para que eu tivesse força e coragem durante a caminhada da minha vida acadêmica.

Aos meu pais, Wilson e Marilda, pelo amor, carinho e principalmente pelo apoio e incentivo durante esta etapa. Ao meu irmão, Michel, que teve grande contribuição aos meus estudos, ensinando e ajudando sempre que precisei.

Ao professor e orientador Eng. Lincoln Salgado, por todas orientações e ensinamentos que possibilitaram a realização deste trabalho.

A esta instituição e todo seu corpo docente, que são altamente qualificados para ensinar e que realizaram seu trabalho com dedicação.

Aos meus familiares e amigos que fizeram parte da minha formação e por estarem sempre ao meu lado em todos os momentos da vida.

RESUMO

Devido ao crescimento do transporte rodoviário, é fundamental para a estrutura do pavimento melhorias nas técnicas construtivas, para proporcionar aos usuários segurança. Com o aumento do volume de tráfego nas vias, o uso de modificantes em ligantes asfálticos tem se tornado necessário, pois apresentam maior resistência ao volume de tráfego, melhorias nas propriedades mecânicas e maior resistência ao envelhecimento. Este trabalho teve o intuito de comparar dois tipos de cimentos asfálticos de petróleo (CAP) modificados, o CAP modificado por polímero e o CAP modificado por pó de borracha, onde foi possível verificar suas características mecânicas e a redução da camada de rolamento entre eles. A metodologia utilizada foi por intermédio do método mecanístico-empírico para dimensionar a espessura da camada de rolamento do concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) com o CAP modificado por borracha, onde foram moldados corpos de prova através do método *Marshall*, para verificar suas características mecânicas e através de um *software* foi possível determinar a espessura da camada de rolamento. A fim de comparar com o CAP modificado por polímero, foram utilizados resultados apresentados por Metz (2016). Consequentemente, foi realizada a comparação entre os dois tipos de CAP, sobre suas características mecânicas, verificou-se que no módulo de resiliência o resultado do CAP modificado por borracha foi de 2,48% superior que o CAP modificado por polímero, quanto a resistência a tração o CAP modificado por polímero apresentou 2,42% superior, e através do dimensionamento foi possível verificar a redução de 1,90% da espessura da camada de rolamento com CAP modificado por borracha.

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

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura do pavimento flexível.....	20
Figura 2: Estrutura tipo pavimento	36
Figura 3: Estrutura do pavimento	36
Figura 4: Curva granulométrica faixa "C"	38
Figura 5: Módulo de Resiliência.....	39
Figura 6: Resistência a tração	40
Figura 7: Clima SisPav.....	41
Figura 8: Dimensionamento da camada de rolamento.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição granulométrica faixa “C” DNIT-ES 112/09	30
Tabela 2: Materiais utilizados para o traço	31
Tabela 3: Temperatura média mensal	35
Tabela 4: Características dos agregados	37
Tabela 5: Características CAP ECOFLEX AB-8	38
Tabela 6: Corpos de Prova	39
Tabela 7: Comparação das espessuras	42

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Quantidade de CAP.....	32
Equação 2: Módulo de resiliência.....	33
Equação 3: Resistência a tração.....	34

LISTA DE ABREVEATURAS

AD	Asfalto diluído
ASTM	American Society for Testing and Materials
°C	Celsius
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CAN	Cimento Asfáltico Natural
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CL	Cura Lenta
CM	Cura Media
CR	Cura Rapida
cm ²	Centímetro Quadrado
cm	Centímetro
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
E	Estabilidade
EAP	Emulsão asfáltica de petróleo
EVA	Etileno-acetato de Vinila
ES	Especificação de Serviço
F	Fluência
IAPAR	Instituto Agronômico do Paraná
IG	Índice de Grupo
IS	Instrução de serviço
kg	Quilograma
kgf	Quilograma-força
ME	Método de Ensaio

mm	Milímetros
MR	Modulo de Resiliência
N	Newton
RL	Ruptura Lenta
RM	Ruptura Media
RR	Ruptura Rápida
RT	Resistência a Tração
SBS	Estireno-butadieno-estireno
SBR	Butadieno-estireno

SUMÁRIO

1 CAPÍTULO 1	14
1.1 INTRODUÇÃO	14
1.2 OBJETIVOS	15
1.2.1 Objetivo Geral.....	15
1.2.2 Objetivos específicos.....	15
1.3 JUSTIFICATIVA.....	16
1.4 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	16
1.5 FORMULAÇÃO DA HIPÓTESE	16
1.6 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	16
2 CAPÍTULO 2	18
2.1 DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS PAVIMENTOS	18
2.1.1 Pavimento flexível	18
2.1.2 Pavimento rígido	18
2.1.3 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	20
2.2.1.4 Sub-base.....	21
2.2.1.5 Base	21
2.2.1.6 Revestimento.....	21
2.3 MATERIAIS PARA PAVIMENTAÇÃO.....	21
2.3.1 Agregados	22
2.3.1.1 Classificação quanto a natureza	22
2.3.1.2 Classificação quanto ao tamanho	22
2.3.1.3 Classificação quanto a 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	25
2.4.2	Melhorias que o polímero emprega.....	25
2.4.3	Asfalto modificado por polímero SBS	25
2.4.4	Asfalto modificado por borracha de pneus	26
2.4.5	Melhorias que a borracha emprega	26
2.5	MISTURA ASFÁLTICA	27
2.5.1	Concreto asfáltico usinado a quente.....	27
2.5.2	Propriedades da mistura	27
2.6	MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS.....	28
2.6.1	Método empírico	28
2.6.2	Método empírico-mecanístico	29
2.6.3	Método mecanístico	29
2.7	DIMENSIONAMENTO DE CAMADA DE ROLAMENTO	29
2.7.1	Determinação da espessura da camada de rolamento	29
3	CAPÍTULO 3	30
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA	30
3.1.1	Faixa granulométrica de trabalho.....	30
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	34
3.3.4.1	Condição climática	35
3.3.4.2	Volume de tráfego	35
3.3.4.2	Estrutura do pavimento.....	36
4	CAPÍTULO 4	37
4.1	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	37
4.1.1	Caracterização mecânica dos agregados	37
4.1.2	Composição granulométrica	37
4.1.3	Corpos de Prova	39
4.1.4	Módulo de Resiliência	39
4.1.5	Resistência a tração por compressão diametral	40

4.1.6 Dimensionamento	40
5 CAPÍTULO 5	43
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	43
6 CAPÍTULO 6	45
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46
ANEXO A - GRANULOMETRIA DOS AGREGADOS E DOSAGEM DA MISTURA	48
ANEXO B - MÓDULO DE RESILIÊNCIA E RESISTÊNCIA A TRAÇÃO	49
ANEXO C - CARREGAMENTO NO SisPav	50

1 CAPÍTULO 1

1.1 INTRODUÇÃO

A pavimentação de uma via é de suma importância para facilitar o acesso aos usuários, abrindo novos caminhos e proporcionando conforto e segurança. Segundo Balbo (2007), uma via serve para dar acesso à educação, saúde, cultura, lazer, convívio social e ao trabalho.

A utilização de vias vem acontecendo há anos, sua história acaba ocorrendo junto com a história da humanidade, onde buscam novos caminhos, exploram novos lugares e desenvolvem novas técnicas. Uma das primeiras vias pavimentadas foi construída com intuito de transportar cargas através de trenós. No decorrer do tempo a quantidade de vias aumentava por conta das expansões de territórios, embarcações marítimas, comércio e fins religiosos. Os romanos foram os primeiros a utilizarem técnicas na pavimentação e melhoraram de acordo com as suas necessidades (BERNUCCI *et al.*, 2008).

No Brasil, a primeira estrada deu-se início em 1560, ligando as cidades São Vicente ao Planalto Piratininga, nomeada de Estrada do Mar ou Velha do Mar, em 1789 foi recuperada e pavimentada uma parte com lajes de granito, conhecida como Calçada de Lorena. Outra estrada histórica é a Estrada Real ou Caminho do Ouro, originando-se de uma trilha usada por índios, em 1660, foi explorado e descoberto que a trilha facilitaria a ligação de São Paulo com o Rio de Janeiro, assim, ajudaria no transporte de mercadorias como ouro e café (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Com o aumento da quantidade de via e sua serventia, no decorrer dos anos, foi fundamental a melhoria das técnicas construtivas, buscando conforto e segurança. A pavimentação de uma via além de proporcionar conforto e segurança ao usuário, tem uma grande influência no desenvolvimento de uma cidade.

Na pavimentação flexível o material ligante é o cimento asfáltico de petróleo (CAP), ligante betuminoso e impermeável, o CAP convencional é o mais utilizado na implantação de uma superfície de rolamento.

Como devem suportar os esforços impostos pelo tráfego e as condições climáticas, a necessidade de aprimorar é importante para pavimentação. Nos últimos anos, tem sido desenvolvido ligantes modificados, com o objetivo de melhorar as propriedades físicas e mecânicas.

A estrutura de um pavimento flexível é em geral composto por camadas finitas, sendo o subleito, reforço subleito, sub base, base, camada de ligação ou binder e por fim a camada de rolamento.

Com a pretensão de comparar os resultados da espessura da camada de rolamento de pavimentos flexíveis em concretos betuminosos usinados à quente, (CBUQ) pela substituição do CAP modificado com polímero do tipo SBS e CAP modificado por pó de borracha de pneus inservíveis do tipo ECOFLEX, será desenvolvida uma análise comparativa.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Comparar o percentual da redução de espessura da camada de rolamento do pavimento flexível, obtida por meio de dimensionamento mecanístico-empírico, quando empregado na composição do CBUQ o CAP modificado com pó de borracha.

1.2.2 Objetivos específicos

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

1.3 JUSTIFICATIVA

Com o crescimento do transporte rodoviário houve a necessidade de aprimorar o pavimento, buscar inovações e técnicas para satisfazer os usuários com segurança e conforto.

Tendo em vista as características do tráfego é importante atender a capacidade das solicitações sobre o pavimento, e a utilização de CAP modificado contribui favoravelmente no mesmo (CERATTI; REIS, 2011).

De acordo com Pinto (2015), Ceratti e Reis (2011), o uso de ligantes asfálticos modificados tem sido mais necessários, conforme as condições de volume de tráfego de veículos e peso por eixo que vem crescendo ultimamente, pois estes apresentam melhorias nas propriedades mecânicas e maiores resistências ao envelhecimento.

Pretende-se fazer uma comparação do dimensionamento da camada de rolamento de pavimento flexível em CBUQ, com o CAP modificado por borracha, e com os resultados proposto por Metz (2016) do CAP modificado por polímero, analisar a redução da espessura de camada de rolamento entre elas e as suas características mecânicas.

1.4 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

É possível reduzir a espessura da camada de rolamento de pavimento flexível em CBUQ substituindo o CAP modificado com polímero por CAP modificado com borracha?

1.5 FORMULAÇÃO DA HIPÓTESE

Empregando o CAP modificado com borracha é possível a redução da espessura da camada de rolamento de pavimento flexível em CBUQ.

1.6 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Limita-se a utilização de dois tipos de CAP, inerente a diminuição da espessura das camadas de rolamento em função do dimensionamento mecanístico-empírico e dos resultados proposto por Metz (2016).

Será realizado a comparação entre o CBUQ empregando o CAP ECOFLEX AB-8, que através de ensaios realizados em laboratório determina-se as características mecânicas e realiza-se o dimensionamento da espessura da camada de rolamento, e o CBUQ empregando o CAP SBS 65/90, utiliza-se os resultados apresentados por Metz (2016), que realizou o mesmo procedimento para determinar as características mecânicas e a espessura da camada de rolamento.

2 CAPÍTULO 2

2.1 DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS PAVIMENTOS

Pavimento é uma estrutura formada por camadas de espessuras finitas, construída sobre uma superfície terraplanada, com finalidade de resistir aos esforços provenientes do tráfego e ações climáticas, proporcionar aos usuários conforto e segurança com a melhoria das condições de rolamento (SENÇO, 2007).

Conforme o DNIT (2006), o pavimento é uma estrutura constituída conforme os materiais empregadas, sendo classificado como pavimento flexível, rígido e semirrígido.

2.1.1 Pavimento flexível

Para Senço (2007), pavimentos flexíveis são aqueles que sofrem deformação elástica, onde a deformação é causada por carregamento, não ocorrendo o rompimento da estrutura.

Sua estrutura é formada pelas principais camadas: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito. E sua composição é basicamente de ligante asfáltico e agregados (BERNUCCI *et al.*, 2008).

De acordo com Balbo (2007), a estrutura do pavimento flexível é dimensionada conforme a compressão e a tração decorrente da flexão, que ocasionam deformações devido aos esforços do tráfego de veículos, assim evitando a deformação permanente e rompimento por fadiga da estrutura.

2.1.2 Pavimento rígido

De acordo com Senço (2007), pavimentos rígidos são aqueles que rompem por tração na flexão, devido a deformação. Definido como pouco deformáveis.

Segundo DNIT (2006), o revestimento tem uma rigidez na sua estrutura, que absorve as tensões aplicadas do carregamento nas camadas inferiores.

Composto por revestimento em concreto de cimento Portland, a estrutura é formada por placas ou blocos de concreto e podem ser armadas ou não com barras de aço.

Dimensionada conforme a resistência à flexão das placas ou blocos de concretos e suas camadas inferiores (BALBO, 2007).

2.1.3 Pavimento semirrígido

Segundo Senço (2007), pavimento semirrígido é uma estrutura mista, onde utilizam-se camadas flexíveis e rígidas na mesma estrutura de pavimento. Sendo executada uma camada de revestimento asfáltico, sobre uma base de revestimento de concreto. Dimensionada em função da tração a flexão.

2.2 ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS

A estrutura de um pavimento é composta por camadas de diferentes tipos de materiais, sobrepostas a partir do subleito, é projetada para atender o número de tráfego de veículos e resistir aos esforços solicitados por eles, evitando danos estruturais como deformação permanente e fadiga (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Segundo o mesmo autor, o comportamento estrutural depende de cada camada, sendo necessário saber sobre as propriedades dos materiais utilizadas, resistência a ruptura e reações das ações climáticas.

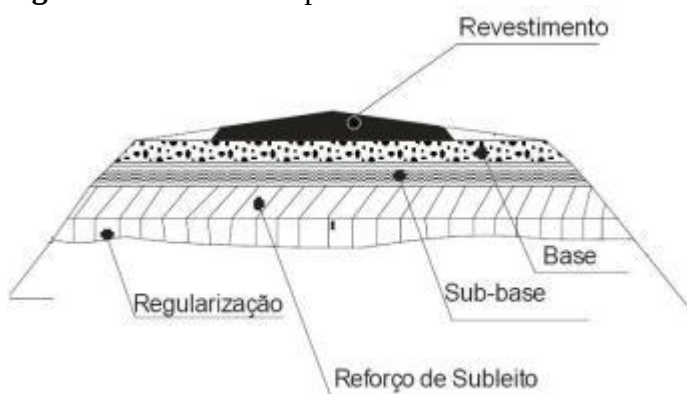
Para Balbo (2007), a estrutura do pavimento recebe e transmite os esforços com finalidade de aliviar as pressões sobre as camadas inferiores. Cada camada tem sua determinada função, que oferece as condições adequadas aos veículos.

De acordo com a classificação dos pavimentos, o que diferenciam é sua estrutura, sendo dimensionadas conforme seu tipo, para pavimento rígido geralmente é composta por subleito, reforço do subleito, sub-base e placa de concreto de cimento Portland, e para pavimento flexível geralmente composta por subleito, reforço do subleito, sub-base, base e revestimento asfáltico (BERNUCCI *et al.*, 2008).

2.2.1 Estrutura de pavimento flexível

De acordo com DNIT (2006), o pavimento flexível é constituído por camadas, conforme Figura 1.

Figura 1: Estrutura do pavimento flexível



Fonte: DNIT (2006)

2.2.1.1 Subleito

É o terreno de fundação do pavimento, constituído por materiais naturais e compactado. Os esforços provenientes do tráfego sobre a superfície são absorvidas e aliviada no subleito (BALBO, 2007).

2.2.1.2 Regularização do subleito

Segundo o DNIT (2006), é a camada sobre o subleito, designado a conformá-lo transversalmente e longitudinalmente de acordo com o projeto do pavimento. A espessura desta camada pode ser regularizada com corte e aterro.

2.2.1.3 Reforço do subleito

É a camada sobreposta no subleito regularizado, constituída por materiais superiores da camada inferior, com finalidade de complementar o subleito e melhorar as qualidades do

mesmo. A espessura desta camada deve estar regularizada para receber a sub-base (SENÇO, 2007).

2.2.1.4 Sub-base

De acordo Senço (2007), é a camada complementar da base, que deve ser utilizada por circunstâncias econômicas e técnicas, pois aconselha-se que não deve ser feito a base diretamente na camada de reforço do subleito.

2.2.1.5 Base

Conforme o DNIT (2006), é a camada sobre a sub-base, com intuito de resistir e distribuir os esforços provenientes pelo tráfego de veículos.

2.2.1.6 Revestimento

Conhecido também como camada de rolamento ou capa de rolamento, esta deve estar tanto quanto possível impermeável, é a camada que tem contato com os veículos. Como recebe diretamente a ação do tráfego, tem como propósito o melhoramento da camada, com intuito de transmitir segurança e conforto para os usuários e resistir aos desgastes proporcionados dos veículos e ações climáticas (SENÇO, 2007)

Segundo o mesmo autor, pode-se considerar a principal camada da estrutura do pavimento, sendo sua principal composição o material asfáltico, capaz de garantir o comportamento da resistência no pavimento.

2.3 MATERIAIS PARA PAVIMENTAÇÃO

Os materiais que são utilizados em uma estrutura de pavimento desde a camada do subleito até ao revestimento, necessitam de profundo conhecimento sobre cada uma delas

além de saber suas características, pois podem interferir no desempenho do pavimento. Os mais utilizados são os agregados e materiais betuminosos (SENÇO, 2007).

2.3.1 Agregados

Os agregados são aqueles que suportam e transmitem as forças aplicadas sobre os pavimentos, e devem apresentar propriedades que sejam suficientes para suportar as tensões aplicadas. Sendo assim, é necessário ter ciência do desempenho de cada agregado utilizado na estrutura (CERATTI; REIS, 2011).

Segundo o mesmo autor, os agregados utilizados na pavimentação são classificados quanto sua natureza, tamanho e distribuição dos grãos.

2.3.1.1 Classificação quanto a natureza

Conforme Bernucci *et al.* (2008), os agregados quanto a natureza são classificados em:

- Natural: São aqueles que se encontram na natureza, obtidos através da desagregação das rochas.
- Artificial: Aqueles que sofrem operações antes do uso, como processos industriais de escória de alto forno ou de aciaria.
- Reciclado: São provenientes do reuso de materiais, como a reciclagem dos resíduos de revestimentos asfálticos.

2.3.1.2 Classificação quanto ao tamanho

De acordo com Ceratti e Reis (2011), os agregados quanto ao tamanho são classificados como:

- Graúdo: São aqueles retidos na peneira nº 10, agregados com dimensões maiores que 2,0mm. São os cascalhos, britas, seixos, etc.
- Miúdo: Aqueles retidos na peneira nº 200, com dimensões superiores que 0,075mm e inferiores que 2,0mm. Como areias, pó de pedra, etc.

- Material de enchimento (fíler): São aqueles que devem passar no mínimo 65% na peneira nº 200, materiais inferiores que 0,075mm. São o cimento Portland, cal hidratada, etc.

2.3.1.3 Classificação quanto a distribuição

Para Pinto (2015), quanto a distribuição ou graduação dos grãos os agregados são classificados em:

- Densa: Aquele que apresenta uma curva granulométrica e contínua de materiais bem graduados, com quantidade de material fino suficiente para preencher os vazios entre as partículas maiores.
- Aberta: Aquele que apresenta uma curva granulométrica e contínua de materiais bem graduados, com quantidade insuficiente de material fino para preencher os vazios entre as partículas maiores.
- Uniforme: Aquele que apresenta a maioria das partículas em um único tamanho.
- Degrau: Aquele que apresenta variações nos tamanhos das partículas, formando um patamar na curva granulométrica.

2.3.2 Materiais betuminosos

Materiais betuminosos são misturas de hidrocarbonetos solúveis em bissulfeto de carbono, com propriedades de aglutinação, são divididos em asfaltos e alcatrões (PINTO, 2015).

Asfalto é um material aglutinante de consistência variável, derivado do petróleo de forma natural ou destilação, como principal elemento, o betume (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Alcatrão é o material obtido através de carbonização ou destilação de matérias orgânicas naturais, como a madeira e o carvão (Senço, 2007).

Segundo o mesmo autor, as principais características dos materiais betuminosos são: a aglutinação entre os agregados e o betume, impermeabilização, durabilidade da mistura, manutenção das propriedades do betume e versatilidade de uso.

2.3.2.1 Cimento asfáltico

Cimento asfáltico é o asfalto obtido através da destilação do petróleo ou de forma natural encontrado em jazidas, denominados como cimento asfáltico de petróleo (CAP), e cimento asfáltico natural (CAN). Utilizados na construção de pavimentos por apresentarem as características e consistências adequadas (PINTO, 2015).

2.3.2.2 Asfalto diluído

Asfalto diluído (AD) é o asfalto dissolvido de cimentos asfálticos em solventes derivados do petróleo, são classificados conforme o tempo de cura ou tempo de evaporação do solvente, como do tipo cura rápida - CR, cura média - CM, cura lenta - CL (SENÇO, 2007).

2.3.2.3 Emulsão asfáltica

Emulsão asfáltica de petróleo (EAP), é a mistura entre dois elementos que não se dissolvem um no outro, por meio de agitação formam uma mistura estável. Pode ser a mistura entre o cimento asfáltico e a água, e deve apresentar estabilidade à ruptura, são classificados conforme a velocidade da ruptura, como emulsão asfáltica de ruptura rápida - RR, ruptura média - RM, ruptura lenta - RL (PINTO, 2015).

2.4 CIMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO

Os ligantes asfálticos convencionais tem um bom comportamento, porém, como as condições de volume de tráfego de veículos e peso por eixo vem crescendo ultimamente, tem sido cada vez mais necessário o uso de modificantes em ligantes asfálticos (CERATTI; REIS, 2011).

A modificação do cimento asfáltico reduz as variações de suas propriedades em relação as temperaturas, assim evitando alterações no comportamento mecânico do pavimento (BERNUCCI *et al.*, 2008).

2.4.1 Polímeros para pavimentação

Para Pinto (2015), os polímeros são substâncias macromoleculares, podem ser encontradas na natureza ou obtidas artificialmente.

Segundo o mesmo autor, são classificados conforme a utilização no meio rodoviário:

- Termorrígidos: Aqueles que, com ação do calor endurecem de forma irreversível, como a resina, epóxi, poliuretano, etc.
- Termoplásticos: Aqueles que, com ação do calor amolecem de forma reversível, como o polietileno, polipropileno atático, etc.
- Elastômeros: Aqueles que, quando aquecidos se decompõem antes de amolecer, com propriedades elásticas, como a borracha sintética (SBR).
- Elastômeros-termoplásticos: Aqueles que, quando aquecidos se comportam como termoplásticos, mas, em temperaturas baixas apresentam propriedades elásticas, como SBS e EVA.

2.4.2 Melhorias que o polímero emprega

De acordo com Pinto (2015), Ceratti e Reis (2011), o cimento asfáltico modificado por polímero apresenta melhorias no pavimento como:

- Aumento do ponto de amolecimento e da viscosidade;
- Maior resistência ao envelhecimento;
- Diminui a suscetibilidade térmica;
- Menor variação do módulo de rigidez com a temperatura;
- Maior resistência à deformação permanente e trincas por fadigas;
- Melhoria no módulo elástico dinâmico;
- Melhoria nas características adesivas e coesivas.

2.4.3 Asfalto modificado por polímero SBS

Um dos polímeros mais empregados atualmente é o estireno-butadieno-estireno (SBS), por apresentar as propriedades necessárias para o pavimento, como a melhoria na

resistência à deformação permanente, menor rigidez do material ligante e maior flexibilidade no material asfáltico (BERNUCCI *et al.*, 2008).

2.4.4 Asfalto modificado por borracha de pneus

A borracha de pneu possui excelentes propriedades físicas e químicas, garantindo a melhoria na durabilidade do pavimento (PINTO, 2015).

Segundo o mesmo autor, o asfalto modificado por borracha, é um ligante asfáltico produzido através da incorporação de borracha moída de pneus inservíveis ao CAP, originando em um asfalto modificado de alto desempenho com melhores valores de viscosidade, ponto de amolecimento e capacidade elástica, comparado com o asfalto convencional. Além de minimizar os problemas ambientais gerado com pneus descartados no meio ambiente.

2.4.5 Melhorias que a borracha emprega

Conforme Pinto (2015), o ligante modificado por borracha apresenta as seguintes características:

- Maior flexibilidade;
- Redução na suscetibilidade térmica;
- Maior resistência ao envelhecimento;
- Aumento da vida útil do pavimento;
- Melhoria no módulo elástico dinâmico;
- Proporciona melhor aderência pneu-pavimento;
- Maior resistência à deformação permanente e trincas por fadigas;
- Reduz o ruído provocado pelo tráfego.

2.5 MISTURA ASFÁLTICA

Consiste na mistura entre os agregados e o material ligante, sua fabricação é realizada em usinas específicas, ou também, pode ser preparado na própria pista para tratamentos superficiais (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Segundo o mesmo autor, existem várias formas de obter a mistura, dependendo do tipo do revestimento e do material ligante que será utilizado, como a frio com uso de EAP ou a quente com uso de CAP.

2.5.1 Concreto asfáltico usinado a quente

Também conhecido como CBUQ, é a mistura entre os agregados graúdos, miúdos, material de enchimento e o ligante betuminoso, misturados a quente em uma usina apropriada (PINTO, 2015).

A mistura a quente pode ser classificada conforme a granulometria dos agregados, como a graduação densa, graduação aberta e graduação descontínua, dependendo de como será utilizado a mistura. Para o concreto asfáltico deve-se apresentar uma graduação densa, com uma curva contínua e bem graduada, se a variação da curva granulométrica for para o lado grosso a mistura será de textura mais aberta, e para o lado mais fino, textura mais fechada (BERNUCCI *et al.*, 2008).

2.5.2 Propriedades da mistura

Conforme Baldo (2007), as misturas asfálticas apresentam propriedades necessárias para o pavimento, como:

- Durabilidade: Resistente ao desgaste proporcionado pelo tráfego de veículos e as ações climáticas;
- Estabilidade: Resistente à deformação permanente;
- Deformação Recuperável (Resiliência): Capacidade de armazenar energia quando submetida pela carga, liberando quando cessa o carregamento que causou a deformação.

- Resistência à fadiga: Deformar pelo carregado submetido repetidamente e não se romper;
- Rigidez: Relação entre tensão e deformação, relacionada ao carregamento e ação climática.

2.6 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Para Senço (2007) e Balbo (2007), o dimensionamento do pavimento consiste na determinação das espessuras de camadas e os tipos de materiais a serem utilizados na sua estrutura, que sejam suficientes para resistir, transmitir e distribuir os esforços provenientes do tráfego e resistir às ações climáticas, evitando problemas como desgastes, deformações e rupturas.

Para ocorrer o dimensionamento existem métodos a serem utilizados, que dependem de diversas condições, como, o volume de tráfego, as características do solo que serve como fundação e o tempo de vida útil do projeto. Pode ser realizado pelos métodos empírico, empírico-mecanístico e mecanístico (BALBO, 2007).

2.6.1 Método empírico

O método empírico começou a ser utilizado a partir de experiências em campo, observando o desempenho ao longo do tempo do projeto, como a observação de repetição de cargas e a resistências dos materiais (BALBO, 2007).

De acordo com Senço (2007), o método é baseado em fórmulas, constantes e coeficientes de experiências em campo, sempre relacionados ao comportamento do pavimento.

Segundo o mesmo autor, existem alguns métodos de dimensionamento empírico como o método do índice de grupo (IG), método HVEEM, método *California Bearing Ratio* (CBR), e o método do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER).

2.6.2 Método empírico-mecanístico

Método baseado no empírico e mecanístico consiste em determinar as condições das camadas do pavimento relacionados a fórmulas aplicadas em relação as tensões e deformações, para prevenir deformações indesejáveis no pavimento, e também é possível analisar os parâmetros do projeto em *softwares* (SENÇO, 2007).

2.6.3 Método mecanístico

O método mecanístico consiste na verificação da análise paramétrica através de *softwares*, onde pode ser analisado as propriedades mecânicas e físicas das camadas do pavimento, e analisa-se as espessuras adotadas, verificando se atendem as solicitações propostas pelo tráfego (FRANCO, 2007).

2.7 DIMENSIONAMENTO DE CAMADA DE ROLAMENTO

Para Balbo (2007), para dimensionar as camadas que formam uma estrutura de pavimento, é necessário determinar o número de camadas para a estrutura.

Segundo o mesmo autor, o dimensionamento inicia-se pela camada de rolamento, onde deve ser adotado uma espessura inicial para a mesma e posteriormente irá dimensionar as demais camadas da estrutura do pavimento.

2.7.1 Determinação da espessura da camada de rolamento

Para a determinação da espessura da camada de rolamento é realizado pelo método mecanístico, através de *software*, que analisa as propriedades mecânicas e físicas das camadas e verifica se a espessura adotada atende as solicitações empregadas pelo tráfego e ações climáticas (FRANCO, 2007).

3 CAPÍTULO 3

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

Para determinar a espessura da camada de rolamento e as características mecânicas para o CBUQ com CAP ECOFLEX AB-8, foi realizado o dimensionamento através do método mecanístico-empírico.

A fim de comparar com o CBUQ com CAP SBS 65/90, foi utilizado os resultados apresentados por Metz (2016), que através do mesmo método de dimensionamento determinou a espessura da camada de rolamento e as características mecânicas.

3.1.1 Faixa granulométrica de trabalho

Para a composição do CBUQ com CAP modificado por borracha, o DNIT-ES 112/09 especifica que deve atender os requisitos propostos da Tabela 1. Sendo assim, foi adotado a faixa C para o dimensionamento.

Tabela 1: 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)

3.2 MATERIAIS

Para realizar a composição do traço foram necessários os seguintes materiais (Tabela 2). Os agregados foram coletadas de uma pedreira comercial e são provenientes de uma jazida basáltica.

Tabela 2: Materiais utilizados para o traço

MATERIAL	QUANTIDADE
CAP:	
ECOFLEX AB-8	100g
Agregado Graúdo:	
Brita ¾"	30 kg
Pedrisco	30 kg
Agregado Miúdo:	
Pó de pedra	20kg
Material de enchimento:	
Cal	20 kg

Fonte: Autor (2017)

3.3 MÉTODO

3.3.1 Método *Marshall*

O DNIT-ES 112/09, especifica que o traço de CBUQ com CAP ECOFLEX AB-8, deve ser dosado através do método de *Marshall* (DNER-ME 043/95). O traço de CBUQ foi fornecido pela construtora B (Anexo A).

O DNER-ME 043/95 especifica que deve ser feito no mínimo três corpos de prova para cada teor de material ligante, sendo assim, iniciou-se adotando um teor para o CAP (T%), a partir deste teor, foram realizados os corpos de provas com teores acima (T+0,5% e T+1,0%) e abaixo (T-0,5 e T-1,0%) do adotado, a fim de determinar o teor ótimo de material ligante.

Posteriormente, são moldados os corpos de prova para todos os teores determinados, então estabelece-se os parâmetros volumétricos: massa específica aparente (g/cm³), volume de vazios (%), vazios do agregado mineral (%), relação betume/vazios (%), e com ensaios determina-se os parâmetros mecânicos: estabilidade e fluência.

Por fim, para determinar o teor ótimo do material ligante, foram traçadas curvas por intermédio dos parâmetros, em função dos teores utilizados. Então, o teor que ficou entre os limites estabelecidos e dentro das especificações da faixa granulométrica de trabalho, será o teor ótimo do projeto.

3.3.1.1 Corpo de prova *Marshall*

Conforme o método de *Marshall*, foram moldados 6 corpos de prova, dos quais foram utilizados para o ensaio de resistência a tração por compressão diametral e ao ensaio de resiliência. Os corpos de prova foram moldados pela construtora B.

Com a dosagem definida, foram moldados os corpos de prova através da composição granulométrica determinada e o teor de CAP, que devem atender aos limites da faixa granulométrica de trabalho "C", conforme a especificação do DNIT-ES 112/09.

Em seguida, os agregados foram colocados em estufa na temperatura de 110°C e separados conforme suas dimensões, seguidamente, foram colocados novamente na estufa com a temperatura entre 10 a 15°C superior a temperatura do CAP, onde foram aquecidos até 177°C. O CAP deve ser aquecido até apresentar a viscosidade de 170+-20 cSt, sendo assim, o CAP foi aquecido até 165°C.

A quantidade de CAP ECOFLEX AB-8 utilizado, foi calculado através da Equação 1, conforme o teor ótimo de projeto, fornecido pela construtora B, que foi determinado de 5,65%, e o peso dos agregados de 1250g.

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

Onde:

M_{ag} : Massa dos agregados (g)

Pa : Teor do material ligante (%)

Então:

$$\text{Quantidade de CAP} = \frac{1250g \times 5,65\%}{100 - 5,65\%} = 74,85 \text{ g}$$

Em seguida, misturou-se os agregados com o CAP, onde foram envolvidos entre eles, e a temperatura da mistura ficou entre 170°C, posteriormente a mistura foi colocada sobre um papel-filtro, a fim da temperatura ficar aproximadamente a 150°C, desta maneira, a mistura foi colocada no molde e acomodado para que ficasse bem agrupada, com a menor quantidade de vazios possíveis, e a superfície ficou alisada para que o material ficasse rente a borda do molde.

Subsequentemente, realizou-se a compactação da amostra com um soquete padrão de 78,5kg, que foi lançado sobre ela de uma altura de 45,72 cm, por 75 vezes na superfície superior e inferior do corpo de prova, posteriormente 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

Foram utilizados 3 corpos de prova moldados pelo método de Marshall e submetidos ao ensaio do módulo de resiliência (MR), conforme a especificação do DNIT-ME 135/2010. Este ensaio foi realizado em um laboratório terceirizado, conforme o laudo no Anexo B.

Para realizar o ensaio foi utilizada uma prensa pneumática, onde o corpo de prova com temperatura de 25°C, que ficou posicionado na posição horizontal e fixado a ela um temporizador eletrônico que controlou o tempo de atuação e a frequência da aplicação da carga, posteriormente, aplicou-se uma carga vertical repetidamente, essa carga gerou uma tensão de tração transversal ao plano de aplicação, podendo assim, medir o deslocamento recuperável na direção horizontal correspondente à tensão gerada. Desta forma, determinou-se a deformação elástica do corpo de prova. Calcula-se o módulo de resiliência por meio da Equação 2:

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

Onde:

MR: Módulo de resiliência (kgf/cm²)

F: Carga vertical repetida (Kgf)

Δ : Deformação elástica registrada (cm)

H: Altura do corpo de prova (cm)

3.3.3 Resistência a tração

Foram submetidos 3 corpos de prova para a realização do ensaio da resistência a tração por compressão diametral (RT), conforme a especificação do DNIT-ME 136/2010. Este ensaio foi realizado em um laboratório terceirizado, conforme o laudo no Anexo B.

Iniciou-se o procedimento determinando as dimensões do corpo de prova, altura e diâmetro, em seguida foi colocado com uma temperatura de 25°C, em uma prensa mecânica, onde foi aplicada uma carga sobre ele até o seu rompimento. Com o valor da carga de ruptura obtido, a resistência a tração é calculada pela Equação 3:

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

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

O dimensionamento da camada de rolamento de pavimento flexível em CBUQ com CAP ECOFLEX AB-8, foi feito recorrendo ao *software* SisPav, desenvolvido por Felipe Franco (2007), que tem como objetivo analisar e dimensionar as estruturas de pavimentos asfálticos, por meio do método de dimensionamento mecanístico-empírico.

Para realizar o dimensionamento foram necessárias algumas informações como a condição climática, volume de tráfego, materiais empregados, tipo do material betuminoso, módulo de resiliência e período de projeto.

Os dados utilizados para a condição climática, volume de tráfego e estrutura do pavimento foram apresentados por Metz (2016), a fim de realizar a mesma proposta de dimensionamento, podendo assim, comparar os resultados entre os dois tipos de CAP.

3.3.4.1 Condição climática

Para entrar com os dados do clima no SisPav, deve-se ter uma relação das temperaturas médias mensais, durante um ano, onde o software calcula a temperatura média anual, o qual será utilizado para o dimensionamento.

Sendo assim, retirou as temperaturas das cartas climáticas do estado do Paraná, que estão disponíveis na página do IAPAR, Instituto Agrônômico do Paraná, conforme a Tabela 3.

Tabela 3: Temperatura média mensal

Temperatura Média Mensal Região de Cascavel-PR						
Mês:	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho
Temp:	23,50 °C	23,50 °C	22,50 °C	20,50 °C	17,50 °C	15,50 °C
Mês:	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
Temp:	15,50 °C	17,50 °C	18,50 °C	20,50 °C	22,50 °C	23,50 °C

Fonte: IAPAR (2016)

3.3.4.2 Volume de tráfego

No SisPav para entrar com a informação do volume de tráfego, é preciso estar de acordo com o carregamento, conforme a configuração eixo por eixo dos veículos, volume de tráfego e a taxa de crescimento anual.

Metz (2016), utilizou os dados da contagem de tráfego da BR-163 entre os municípios de Cascavel-PR e Marmelândia-PR, no ano de 2012. Neste caso, foram lançadas as mesmas contagens de tráfego no SisPav, conforme o Anexo C.

3.3.4.2 Estrutura do pavimento

A estrutura do pavimento foi utilizada conforme Metz (2016), informando os materiais que compõem a estrutura, o módulo de resiliência e o coeficiente de Poisson. Conforme a Figura 2:

Figura 2: Estrutura tipo pavimento

Estrutura Pavimento Análísado				
Camada de Material		Espessura	Módulo Resiliência (Mr)	Coeficiente Poisson
	CBUQ	Dimensionar	-	0,30
	Brita Graduada Com Cimento	20 cm	5000 MPa	0,25
	Macadame Hidráulico	25 cm	350 MPa	0,35
	Subleito	Não considera	90 MPa	0,40

Fonte: Metz (2016)

Sendo assim, as informações obtidas foram lançadas (Figura 3) no SisPav, a fim de finalizar o dimensionamento da espessura da camada de rolamento com o CAP ECOFLEX AB-8.

Figura 3: Estrutura do pavimento



CAMADA	MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO BORRACHA	Projeto			0,30
2	BRITA GRADUADA COM CIMENTO (BGTC)	Projeto	15,0	5000	0,25
3	MATERIAL GRANULAR	Projeto	20,0	350	0,35
SL	SUBLEITO	Projeto	0,0	90	0,40

Fonte: SisPav (2017)

4 CAPÍTULO 4

4.1 RESULTADOS E DISCUÇÕES

4.1.1 Caracterização mecânica dos agregados

A caracterização dos agregados foram fornecidas pela construtora B (ANEXO A), e foi verificado se os materiais utilizados atendiam as especificações do DNIT-ES 112/09, os limites e os resultados estão apresentados na Tabela 4:

Tabela 4: Características dos agregados

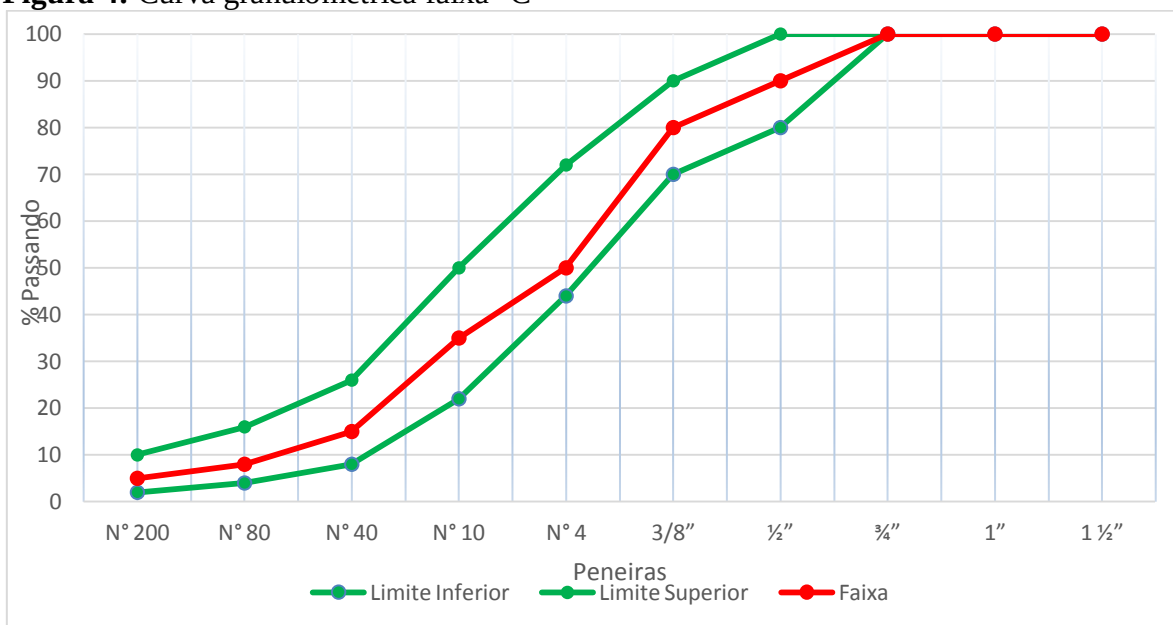
Características	Aplica-se Agregado	Norma de Referência	Und.	Limites da ES	Resultado
				112/09	
Abrasão <i>Los Angeles</i>	Graúdo	DNER-ME 035/98	%	≤ 50	18,4
Índice de forma	Graúdo	DNER-ME 086/94	%	$> 0,5$	0,78
Durabilidade (perda)	Graúdo	DNER-ME 089/94	%	< 12	4
Equivalência de areia	Miúdo	DNER-ME 054/94	%	≥ 55	61,4

Fonte: Autor (2017)

Diante do exposto na tabela, verificou-se que os agregados atenderam as especificações do DNIT-ES 112/09.

4.1.2 Composição granulométrica

A composição granulométrica da mistura de CBUQ, foram fornecidas pela construtora B (ANEXO A), e foram verificados se os limites da composição da faixa C utilizada, para o CAP ECOFLEX AB-8, conforme a especificação do DNIT-ES 112/09, estavam dentro do limite, conforme apresentados na Figura 4:

Figura 4: Curva granulométrica faixa "C"

Fonte: Autor (2017)

Em concordância com o que foi representado no gráfico, nota-se que a curva granulométrica está dentro do limite, de acordo com a especificação do DNIT.

Além disso, o DNIT-ES 112/09, especifica as características dos materiais que a mistura deve apresentar, de acordo com a faixa C, os limites e os resultados são apresentados na Tabela 5:

Tabela 5: Características CAP ECOFLEX AB-8

Características	Norma de Referência	Und.	Limites da ES	Resultado
			112/09	
Percentual de vazios	DNER-ME 043/95	%	3 a 5	4
Relação betume/vazio	DNER-ME 043/95	%	65 a 78	74,2
Estabilidade, mínima	DNER-ME 043/95	Kgf	700	1.310
Fluência	DNER-ME 043/95	mm	2 a 4,5	nsa

Fonte: Autor (2017)

De acordo com a tabela, os resultados estão de acordo com o limite, atendendo a especificação do DNIT.

4.1.3 Corpos de Prova

Foram moldados 6 corpos de prova, através da dosagem fornecida pela construtora B, sendo eles, 3 corpos de prova para o ensaio de resiliência e 3 corpos de prova para o ensaio de resistência a tração por compressão diametral. Os corpos de provas moldados, são apresentados na Tabela 6:

Tabela 6: Corpos de Prova

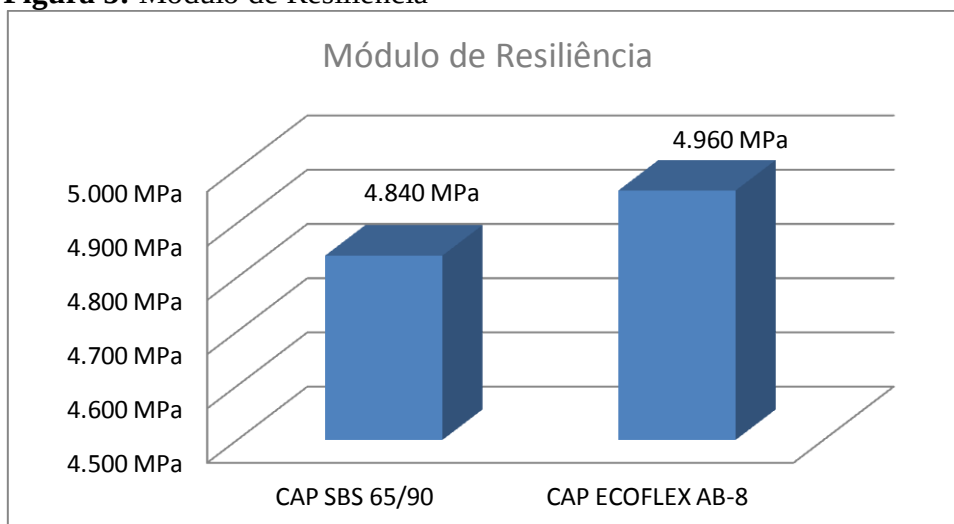
Corpo de Prova	CAP	Peso (g)	Empregado no ensaio
CP - 01	ECOFLEX AB-8	1.297,40	Módulo de Resiliência
CP - 02	ECOFLEX AB-8	1.296,60	Módulo de Resiliência
CP - 03	ECOFLEX AB-8	1.299,90	Módulo de Resiliência
CP - 04	ECOFLEX AB-8	1.298,50	Resistência a Tração
CP - 05	ECOFLEX AB-8	1.299,70	Resistência a Tração
CP - 06	ECOFLEX AB-8	1.298,90	Resistência a Tração

Fonte: Autor (2017)

4.1.4 Módulo de Resiliência

O módulo de resiliência para o CAP ECOFLEX AB-8 foi determinado em 4960 MPa. A fim de comparar com o CAP SBS 65/90, o módulo de resiliência apresentado por Metz (2016), foi de 4840 MPa, apresentados na Figura 5. Pode-se verificar que, utilizando o CBUQ com CAP ECOFLEX AB-8, apresenta o módulo de resiliência de 2,48% superior que o CBUQ com CAP SBS 65/90. Os resultados estão de acordo com o que o DNIT apresenta.

Figura 5: Módulo de Resiliência

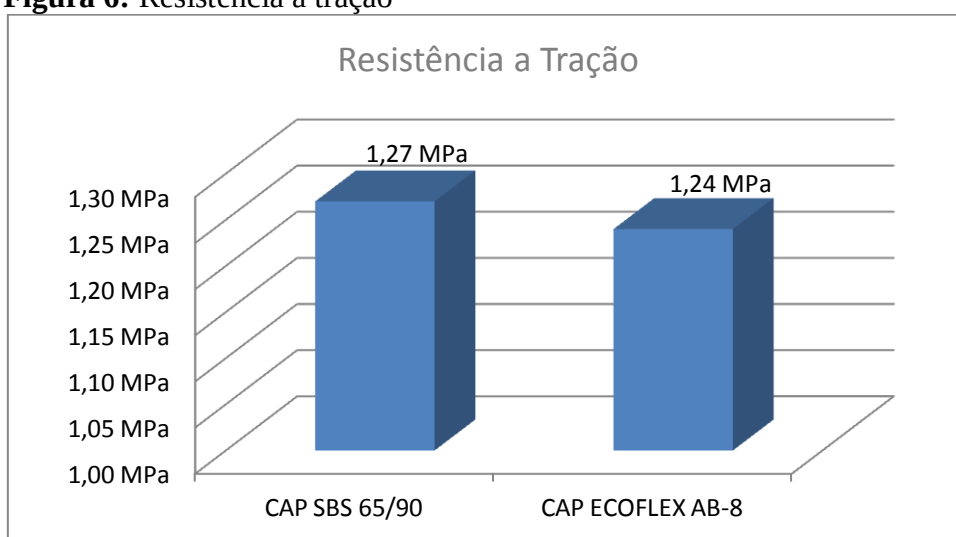


Fonte: Autor (2017)

4.1.5 Resistência a tração por compressão diametral

A resistência a tração por compressão diametral, empregando o CAP ECOFLEX AB-8 resultou-se em 1,24 Mpa, e empregando o CAP SBS 65/90 apresentado por Metz (2016), resultou em 1,27 Mpa, apresentados na Figura 6. Nota-se, que o CBUQ empregando o CAP SBS 65/90 apresenta a resistência a tração por compressão diametral de 2,42% superior que empregando o CAP ECOFLEX AB-8. Os resultados estão de acordo com o que O DNIT apresenta.

Figura 6: Resistência a tração

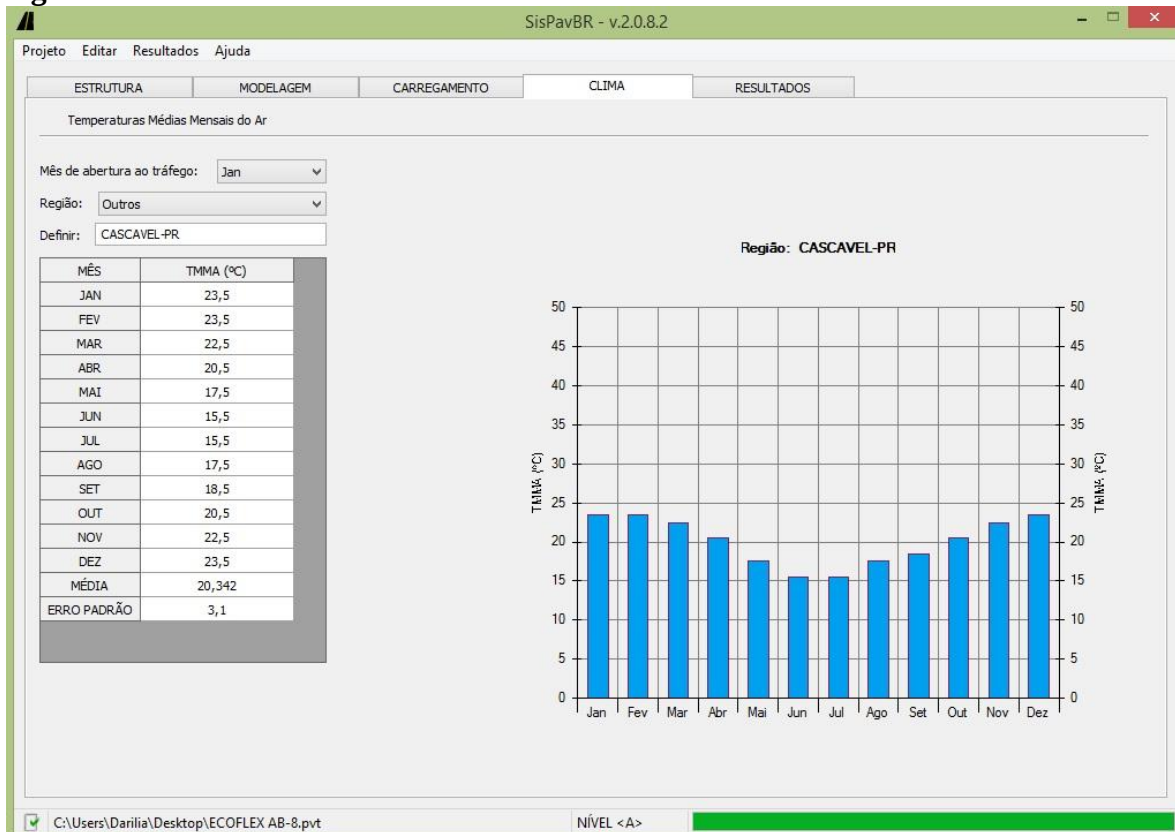


Fonte: Autor (2017)

4.1.6 Dimensionamento

Com intuito de comparar a espessura da camada de rolamento em CBUQ com dois tipos de CAP, modificado por borracha (ECOFLEX AB-8) e o modificado por polímero (SBS 65/90), foram utilizados alguns dados apresentadas por Metz (2016), como o período do projeto, o carregamento, a estrutura do pavimento e os materiais empregados.

Quanto ao clima, foram lançadas as temperaturas retiradas da página do IAPAR, conforme o período do projeto, a média anual de 20,342°C foi calculada pelo SisPav, conforme a Figura 7.

Figura 7: Clima SisPav

Fonte: SisPav (2017)

Desta forma, o dimensionamento para o CBUQ com CAP ECOFLEX AB-8 foi realizado com as informações do clima, o carregamento (Anexo C), a estrutura do pavimento, materiais empregados e o módulo de resiliência obtida no ensaio, que foi 4960 MPa. Todos os dados foram lançados no SisPav, sendo assim, o dimensionamento foi realizado, conforme a Figura 8.

Figura 8: Dimensionamento da camada de rolamento

Fonte: SisPav (2017)

Nota-se que a espessura da camada de rolamento em CBUQ com CAP ECOFLEX AB-8 é de 15,5 cm. Quanto ao dimensionamento do CBUQ com CAP SBS 65/90 realizado por Metz (2016), a espessura da camada de rolamento apresentou em 15,80 cm, apresentados na Tabela 7. Deste modo, comparando a espessura da camada de rolamento em CBUQ entre o CAP modificado por borracha e o CAP modificado por polímero, nota-se que a diferença entre eles é de 0,30 cm, sendo assim, a redução da espessura de camada de rolamento de pavimento flexível em CBUQ empregando o CAP ECOFLEX é de 1,90%.

Tabela 7: Comparação das espessuras

CBUQ	CAP SBS 65/90	CAP ECOFLEX AB-8
Espessura	15,8 cm	15,5 cm
Redução	0,30 cm	
	1,90%	

Fonte: Autor (2017)

Em vista das espessuras apresentadas, pode-se dizer que existe uma diferença mínima entre eles, entretanto, esta diferença pode ser maior, pois o *software* não analisa as propriedades do CBUQ, analisa somente a estrutura do pavimento.

5 CAPÍTULO 5

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi possível efetuar a comparação de resultados de CBUQ com dois tipos de CAP modificados, através de suas espessuras da camada de rolamento e suas características mecânicas como a resiliência e a tração, estas características é de suma importância pois prever o comportamento das misturas asfálticas em campo, tais como, a resistência aos esforços, capacidade elástica, resistência ao envelhecimento, melhor distribuição aos esforços recebidos.

Baseou-se na comparação entre o CBUQ com CAP modificado por polímero, SBS 65/90, e o CBUQ com CAP modificado por borracha, ECOFLEX AB-8. Em vista disto, o dimensionamento foi realizado para o CAP ECOFLEX AB-8, através do método mecanístico-empírico. Para o CAP SBS 65/90 foram utilizados os resultados apresentados por Metz (2016), que usou o mesmo método. Em virtude disto, foram necessários utilizar alguns dados apresentados por Metz (2016), para poder realizar o dimensionamento da camada de rolamento para o CBUQ com CAP modificado por borracha.

Portanto, iniciou-se o dimensionamento para o CBUQ com CAP ECOFLEX AB-8 com a determinação da faixa granulométrica de trabalho conforme o DNIT especifica. Os corpos de prova foram moldados através do método *Marshall*, a fim de realizar ensaios para determinar as características mecânicas.

Comparando os resultados do módulo de resiliência entre os dois CAP, nota-se que existe uma mínima diferença entre os dois, o CAP ECOFLEX AB-8 apresentou 2,48% superior do que o CAP SBS 65/90. Em vista disto, pode-se dizer que a alteração do comportamento dos pavimentos flexíveis em CBUQ empregando os dois tipos de CAP é mínima, porém, efetivamente o CAP modificado por borracha tem um melhor comportamento, isto é, melhor característica elástica do material ligante, maior vida de fadiga e maior resistência as trincas decorrentes das solicitações do tráfego.

Com relação aos resultados da resistência a tração por compressão diametral, pode-se notar que a diferença entre os dois CAP também é mínima, porém neste caso, o CAP SBS 65/90 apresentou 2,42% superior do que o CAP ECOFLEX AB-8. Desta forma, pode-se verificar que o CAP ECOFLEX AB-8, tem uma resistência inferior a tração.

Conforme os resultados, nota-se, que no módulo de resiliência o CAP ECOFLEX AB-8 apresentou melhor comportamento, quanto a resistência a tração o CAP SBS 65/90 apresentou melhor resultado. Segundo as bibliografias consultadas, não apontam uma correlação entre MR e RT, a possível explicação sobre esta diferença é a recuperação elástica dos cimentos asfálticos serem diferentes.

Em última análise, comparando as espessuras de camada de rolamento de pavimentos flexíveis em CBUQ entre os dois tipos de CAP, foi possível verificar uma diferença de 3mm. Devido a isto, empregando o CAP ECOFLEX AB-8 é possível uma redução de 1,9%. No que se refere, que este material ligante tem uma melhor recuperação elástica, maior resistência aos esforços, maior flexibilidade e melhor módulo de resiliência inerente ao comportamento elástico.

Nota-se que as comparações realizadas entre os dois CAP tem diferenças mínimas, isto porque trata-se de dois CAP modificados. A utilização de materiais ligantes modificados consiste na melhoria das características, como a durabilidade do revestimento, aumentando a vida útil, maior resistência à deformação e trincas decorrentes ao esforço solicitado pelo tráfego, consequentemente proporcionando mais segurança aos usuários.

Convém ressaltar, que o CAP ECOFLEX AB-8, é um material ligante modificado por pó de borracha de pneus inservíveis, pois além de proporcionar melhores características, ajuda a colaborar com o meio ambiente, já que é um dos maiores problemas ambientais existentes.

Por fim, conclui-se, que através do dimensionamento mecanístico-empírico é possível a redução da espessura da camada de rolamento de pavimento flexível em CBUQ empregando o CAP modificado com borracha.

6 CAPÍTULO 6

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista os resultados obtidos neste trabalho, são feitas as seguintes sugestões para futuros estudos:

- Realizar a comparação de custo entre os dois CAP considerando produção e execução;
- Realizar o mesmo estudo, utilizando CAP diferentes, tanto para modificado com polímero quanto para modificado com borracha;
- Analisar o comportamento dos dois CAP em campo.
- Realizar o mesmo estudo em 3 laboratórios diferentes para os dois CAP.
- Realizar o mesmo estudo, utilizando o maior e o menor volume de tráfego na rodovia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**, Adeba, Rio de Janeiro, 2008.

CERATTI, Jorge Augusto Pereira; DE REIS, Rafael Marçal Martins. **Manual de Dosagem de Concreto Asfáltico**, Instituto Pavimentar, Oficina de Textos, São Paulo, 2011.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-ME 086/94**, Agregados – Determinação do Índice de Forma – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1994.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-ME 089/94**, Agregados – Avaliação de Durabilidade Pelo Emprego de Solução de Sulfato de Sódio ou de Magnésio – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1994.

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

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-ME 054/97**, Equivalente de Areia – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1997.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-ME 035/98**, Agregados – Determinação da Abrasão *Los Angeles* – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1998.

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

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

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

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

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

METZ, M. **Análise técnica da redução das espessuras das camadas de rolamento de pavimentos flexíveis em CBUQ pela substituição do CAP 50/70 pelo CAP SBS 65/90**.

2016. 77 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil)-Centro Universitário Assis Gurgacz, Cascavel, 2016.

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.

ANEXO A - GRANULOMETRIA DOS AGREGADOS E DOSAGEM DA MISTURA

PROJETO : CBUQ								DATA: 15/12/2016				
CLIENTE:								ESPECIFICAÇÃO: DNIT ES 031/2006				
OBRA:								FAIXA : 'C"				
RESULTADOS FINAIS												
GRANULOMETRIA DOS AGREGADOS E DOSAGEM DA MISTURA												
(DNIT-ME 083/98)												
#	BRITA 3/4"	PEDRISCO	PÓ DE PEDRA	0	0		MISTURA % (DNER-ME 053/98)	FAIXA DE TRABALHO		0 DNIT 031/2006 ES		TOLERANCIA
11/2"	100	100,00	100,00	0,00	100,00		100,0	100	100	100	100	7+/-
1"	100	100,00	100,00	0,00	100,00		100,0	100	100	100	100	7+/-
3/4"	100	100,00	100,00	0,00	100,00		100,0	100	100	100	100	5+/-
1/2"	34,5	100,00	100,00	0,00	100,00		86,9	80	94	80	100	5+/-
3/8"	4,7	100,00	100,00	0,00	100,00		80,9	70	88	70	90	5+/-
Nº 4	1,0	20,00	99,70	0,00	100,00		52,9	44	58	44	72	5+/-
Nº 10	0,8	1,00	69,60	0,00	100,00		32,5	28	38	22	50	5+/-
Nº 40	0,6	0,70	33,40	0,00	100,00		15,7	11	21	8	26	5+/-
Nº 80	0,5	0,60	21,50	0,00			10,0	7	13	4	16	3+/-
Nº 200	0,4	0,40	12,80	0,00	91,59		6,1	4	8	2	10	2+/-
% AGR.	20,00%	34,00%	46,00%	0,00%	0,00%							
ENSAIO MARSHALL (DNIT -ME 043/95)							Resultado	Unidade	Especificação	Limites		
										Mínimo	Máximo	
Teor de Asfalto							5,01	%	DNIT-ME 117/94	4,7	a	5,3
Densidade Aparente							2,596	kg/cm³	DNIT-ME 117/94			
Densidade Máx. Teórica (Rice)							2,710		AASHTO T 209-99			
Estabilidade							1274	kgf	DNIT-ME 043/95	500	Kgf	
Vol. Vazios							4,2	%	DNIT-ME 043/95	3	a	5
Resistência à Tração por Compressão Diametral (25.° C)							1,12		DNIT-ME 136/2010			
Vol. Agregado Mineral							17,2	%	DNIT-ME 043/95	14	min.	
R.B.V.							75,5	%	DNIT-ME 043/95	75	a	82
Lamelaridade							16,1	%	DNIT-ME 054/97			25
Durabilidade							4,0	%	DNIT-ME 054/98			12
Abrasão " Los Angele "							18,4	%	DNIT-ME 054/99			40
SATISFATÓRIA												
Adesividade do Ligante ao Agregado									DNIT-ME 078/94			
Impureza								%	DNIT-ME 055/95			
Equivalente de Areia							61,4	%	DNIT-ME 054/97	55		
Temperatura de Compactação							146,0			120		177
Temperatura do Ligante							159,5					
Observação: Adesividade satisfatória sem uso de DOPE												
Laboratorista						Engº Civil						

ANEXO B - MÓDULO DE RESILIÊNCIA E RESISTÊNCIA A TRAÇÃO

Ao Eng.^o Lincoln Salgado

Prezado amigo,

Conforme solicitado, foram realizados os ensaios de MÓDULO DE RESILIÊNCIA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL CÍCLICA conforme metodologia DNER-ME 133/94, onde:

Os corpos de prova foram recebidos em embalagem de papelão, removidos da embalagem e renomeados, conforme padrão de procedimento interno:

Conforme informação, o CAP utilizado foi:

- ECOFLEX B: Asfalto modificado por pó de borracha de pneus inservíveis (Asfalto-Borracha) –

ANP tipo AB-8 e DNIT – 111 / 2009 – EM;

Tipo de Ligante	CP – CORPO DE PROVA		
CAP AB-8	CP 1 - CM	CP 2 - CM	CP 3 - MR

- Posteriormente foram aferidas suas características físicas.

O equipamento utilizado possui um sistema pneumático de carregamento que permite a aplicação de uma carga vertical repetida na amostra utilizando-se um temporizador eletrônico acoplado que controla o tempo atuação da pressão e a frequência da aplicação da carga. deslocamentos são medidos por *LVDT-linear variable diferencial transformer*. Vale ressaltar o controle de temperatura automatizado do equipamento.

PROCEDIMENTO:

- Posicionamento dos corpos de prova e fixação dos *LVDTs*;
- Assentamento do pistão de carga;
- Acondicionamento e aplicação dos ciclos de carregamento;
- Anotação dos resultados encontrados para cálculo.

RESULTADOS:

Conforme cálculos os resultados obtidos foram:

MATERIAL	CAP	RESISTENCIA À TRAÇÃO (RT)		MÓDULO DE RESILIENCIA (MR)		MR/RT
		MPa	Kgf/cm ²	MPa	Kgf/cm ²	
C.B.U.Q.	ECOFLEX AB - 8	1,24	12,40	4960,00	49600,00	3994,06

Sendo o que tínhamos para o momento firmamos votos de apreço.

ANEXO C - CARREGAMENTO NO SisPav

SisPavBR - v.2.0.8.2

Projeto

Editar

Resultados

Ajuda

ESTRUTURA

MODELAGEM

CARREGAMENTO

CLIMA

RESULTADOS

Eixo padrão rodoviário

Eixo Simples

Dois eixos simples (direcional)

Eixo simples de roda dupla

Dois eixos duplos

Dois eixos duplos em tandem

Três eixos duplos em tandem

Inserir >>

<<<< << Remover

N = 6,279e+05

EIXO	CONFIGURAÇÃO	RODAS	VOLUME (1º Ano)	TAXA (‰/ano)	CARGA (ton)	PRESSÃO (MPa)	Sx (cm)	Sy (cm)	ÁREA (cm²)	RAIO (cm)
1	Eixo Simples	2	132	3,16	6,00	0,80	0,00	0,00	375,0000	10,925
2	Eixo simples de roda dupla	4	132	3,16	10,00	0,80	32,40	0,00	312,5000	9,973
3	Eixo Simples	2	95	3,16	6,00	0,80	0,00	0,00	375,0000	10,925
4	Dois eixos duplos em tandem	8	95	3,16	17,00	0,80	32,40	120,00	265,6250	9,195
5	Eixo Simples	2	476	4,48	6,00	0,80	0,00	0,00	375,0000	10,925
6	Eixo simples de roda dupla	4	476	4,48	10,00	0,80	32,40	0,00	312,5000	9,973
7	Eixo Simples	2	639	4,48	6,00	0,80	0,00	0,00	375,0000	10,925
8	Dois eixos duplos em tandem	8	639	4,48	17,00	0,80	32,40	120,00	265,6250	9,195
9	Dois eixos simples (direcional)	4	71	4,48	12,00	0,80	0,00	120,00	375,0000	10,925
10	Dois eixos duplos em tandem	8	71	4,48	17,00	0,80	32,40	120,00	265,6250	9,195
11	Eixo Simples	2	12	4,48	6,00	0,80	0,00	0,00	375,0000	10,925
12	Eixo simples de roda dupla	4	12	4,48	10,00	0,80	32,40	0,00	312,5000	9,973
13	Eixo Simples	2	200	4,48	6,00	0,80	0,00	0,00	375,0000	10,925
14	Eixo simples de roda dupla	4	200	4,48	10,00	0,80	32,40	0,00	312,5000	9,973
15	Dois eixos duplos em tandem	8	200	4,48	17,00	0,80	32,40	120,00	265,6250	9,195
16	Eixo Simples	2	934	4,48	6,00	0,80	0,00	0,00	375,0000	10,925
17	Dois eixos duplos em tandem	8	934	4,48	17,00	0,80	32,40	120,00	265,6250	9,195
18	Dois eixos duplos em tandem	8	934	4,48	17,00	0,80	32,40	120,00	265,6250	9,195
19	Eixo Simples	2	1036	4,48	6,00	0,80	0,00	0,00	375,0000	10,925
20	Dois eixos duplos em tandem	8	1036	4,48	17,00	0,80	32,40	120,00	265,6250	9,195
21	Três eixos duplos em tandem	12	1036	4,48	25,50	0,80	32,40	120,00	265,6250	9,195
22	Eixo Simples	2	95	4,48	6,00	0,80	0,00	0,00	375,0000	10,925
23	Eixo simples de roda dupla	4	95	4,48	10,00	0,80	32,40	0,00	312,5000	9,973
24	Eixo simples de roda dupla	4	95	4,48	10,00	0,80	32,40	0,00	312,5000	9,973

<

>

C:\Users\Danilia\Desktop\ECOFLEX AB-8.pvt

NÍVEL <A>

[illegible]