



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE ANGICOS – CMA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS – DENG
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

KAIO HENRIQUE GOMES LEITE

**CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE (CBUQ) COM
RESÍDUO DE BORRACHA – INFLUÊNCIA NO ORÇAMENTO FINAL DO
PROJETO DE PAVIMENTAÇÃO**

ANGICOS – RN

2021

KAIO HENRIQUE GOMES LEITE

**CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE (CBUQ) COM
RESÍDUO DE BORRACHA – INFLUÊNCIA NO ORÇAMENTO FINAL DO
PROJETO DE PAVIMENTAÇÃO**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, Campus Angicos, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.(a) Dra. Marcilene Vieira da Nóbrega.

ANGICOS – RN

2021

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

1533c leite, kaio henrique gomes.
CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE (CBUQ)
COM RESÍDUO DE BORRACHA ? INFLUÊNCIA NO ORÇAMENTO
FINAL DO PROJETO DE PAVIMENTAÇÃO / kaio henrique
gomes leite. - 2021.
43 f. : il.

Orientador: Marcilene Vieira da Nóbrega.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2021.

1. Asfalto. 2. Resíduo de Pneus Inservíveis. 3.
Orçamento. 4. Viabilidade. I. Nóbrega, Marcilene
Vieira da, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo) autor(a).

Biblioteca Campus Angicos
Bibliotecário: Helder Romero Maia Duarte
CRB: 15/673

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

KAIO HENRIQUE GOMES LEITE

**CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE (CBUQ) COM
RESÍDUO DE BORRACHA – INFLUÊNCIA NO ORÇAMENTO FINAL DO
PROJETO DE PAVIMENTAÇÃO**

Monografia apresentada à Universidade Federal
Rural do Semi-Árido – UFERSA, Campus
Angicos, para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

APROVADA EM: 18/11/2021

BANCA EXAMINADORA

**Marcilene Vieira
da Nóbrega**

Assinado de forma digital por
Marcilene Vieira da Nóbrega
Dados: 2021.11.19 14:23:30 -03'00'

Profª. Dra. Marcilene Vieira da Nóbrega (UFERSA)
Presidente

**ANDREZA KELLY
COSTA NOBREGA DOS
SANTOS:**

Assinado de forma digital por
ANDREZA KELLY COSTA NOBREGA
DOS SANTOS:
Dados: 2021.11.22 10:36:26 -03'00'

Profª. Dra. Andreza Kelly Costa Nóbrega dos Santos (UFERSA)
Membro Examinador 1

**LUIS HENRIQUE
GONCALVES
COSTA:**

Assinado de forma digital por
LUIS HENRIQUE GONCALVES
COSTA:
Dados: 2021.11.19 14:05:19
-03'00'

Prof. Me. Luis Henrique Gonçalves Costa (UFERSA)
Membro Examinador 2

Dedico este trabalho a todos que contribuíram e me encorajaram de alguma forma na minha caminhada acadêmica, em especial a minha mãe que não mediu esforços para que eu pudesse chegar até aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeira e primordialmente a Deus que me concedeu, muito mais que a vida, e que esteve sempre comigo, ensinando-me a melhor maneira de vivê-la. Obrigada por tudo!

A minha orientadora Professora Dra. Marcilene Vieira da Nóbrega pelas orientações, incentivos, aprendizados, oportunidade, amizade e acima de tudo pela paciência.

Chegar até aqui não foi fácil e, não me refiro apenas às dificuldades acadêmicas enfrentadas por grande parte dos discentes, mas a todos os obstáculos que insistiram em aparecer no decorrer desses últimos anos. Mais tudo na vida tem um propósito, hoje eu posso contemplar os grandes feitos do Senhor em minha vida. Por inúmeros motivos agradeço a todos aqueles que me amam e estão ao meu lado, independente das circunstâncias, em especial a minha mãe Ecione Gomes, a grande responsável por minhas conquistas, se não fosse a senhora eu não conseguiria. Por infinitas razões és a luz da minha vida, aquela que sempre esteve ao meu lado em todos estes 23 anos, nunca me deixou faltar nada e proporciona a realização dos meus sonhos. Essa vitória é principalmente da senhora, mãe. Obrigada do fundo do meu coração por esse amor incondicional e todos esses anos que batalha para nos dá a educação que não alcançou.

Aos meus amigos mais próximos Alison henrique e Junior torres, por me ajudarem neste momento tão difícil que estou passando, e muito obrigado pela amizade de vocês dois. Quero levar essas amizades para o resto da minha vida. Aos amigos que ganhei através da universidade, no qual compartilhamos dos momentos de estudos e/ou de descontração, sendo os responsáveis pelos meus melhores momentos vividos no decorrer da graduação, Matheus Davi, Erica Vanessa, Joerdson Tiago, Ana Carolina, Erika Oliveira, Paulo Rodolpho, Izabele Gusmão, Mariane Dalyston, Ronaldo Roberto, Myliane Samara. Obrigado a todos.

Agradeço a empresa LCM construção e comercio, ao eng. Yelbo alexandre e carlos Jorge. Por todo conhecimento repassado.

Agradeço a minhas irmãs Ana Clara Gomes Leite e Káhlia Gomes Leite por sempre me incentivar e ajudar em momentos da vida, e aos demais familiares.

Agradeço aos professores que tive nessa instituição, todos de alguma forma contribuíram para todo conhecimento adquirido até então, aos servidores por serem tão dedicados a nos proporcionar o melhor.

Enfim, meu muito obrigado a cada um de vocês.

“Só se pode alcançar um grande êxito quando
nos mantemos fiéis a nós mesmos.”

Friedrich Nietzsche.

RESUMO

O descarte de pneus nos últimos anos tem aumentado consideravelmente. A reutilização de pneus inservíveis nas misturas asfálticas tem se tornado bastante vantajoso para o setor da pavimentação. A borracha de pneu incorporada à mistura produz um material durável, resistente e sustentável. Visando isso, o presente trabalho tem como objetivo principal realizar um estudo comparativo técnico, econômico e ambiental entre o asfalto-borracha e o asfalto convencional (CAP 50/70). A pesquisa tem como objetivo avaliar se o asfalto borracha é mais viável em termos financeiro se comparado ao asfalto convencional com Cap 50/70. Para tal, foi realizado um comparativo utilizando as composições de custos unitários fornecidas pelo SICRO (Sistema de Custos Referencias de Obras) do RIO GRANDE DO NORTE implantando esses dados em modelos de orçamento elaborados pela Greca Asfaltos. Por meio dessa comparação, identificou-se uma melhora significativa no desempenho do asfalto modificado por borracha e comprovou que com esse ligante há uma maior economia no custo total de execução de uma obra. No estudo em questão houve uma redução de 32,21% do valor do orçamento do asfalto borracha em relação ao asfalto convencional, em vista da sua redução de espessura. Logo, observou-se que de acordo com os benefícios encontrados no asfalto-borracha, ele se torna uma alternativa viável em substituição ao convencional.

Palavras-chave: Asfalto. Resíduo de Pneus Inservíveis. Orçamento. Viabilidade.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais manifestações patológicas que afetam os pavimentos flexíveis	25
Quadro 2 – Dados utilizados para elaboração dos orçamentos.....	31
Quadro 3 – Quantidade de massa asfáltica dos dois materiais em estudo.....	32
Quadro 4 – Custos horários total de execução.....	32
Quadro 5 – Custos unitários direto totais.....	33
Quadro 6 – Descrição de Custos.....	33
Quadro 7 – Redução de custo do asfalto borracha em relação ao convencional.....	34

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema da seção transversal do pavimento rígido.....	15
Figura 2 – Esquema da seção transversal do pavimento semi-rígido.....	15
Figura 3 – Esquema de seção transversal do pavimento.....	17
Figura 4 –Vantagens AB.....	21
Figura 5 – Esquema de fabricação do asfalto-borracha por via seca.....	21
Figura 6 – Esquema de fabricação do asfalto-borracha por via úmida	23
Figura 7 – Exemplo de consistência do asfalto-borracha	24
Figura 8 – Extensão da BR 427.....	29
Figura 9 - Fluxograma das etapas do orçamento.....	33

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AB - Asfalto Borracha

CAP - Cimento Asfáltico de Petróleo

CBUQ - Concreto Betuminoso Usinado a Quente

DNIT- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

SICRO - Sistema de Custos Referenciais de Obras

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	14
1.1.1	Objetivo geral.....	14
1.1.2	Objetivos específicos	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1	TIPOS DE PAVIMENTOS	15
2.1.1	Pavimentos rígidos.....	15
2.1.2	Pavimentos semi-rígidos.....	16
2.1.3	Pavimentos flexíveis.....	17
2.2	CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE (CBUQ).....	18
2.2.1	Materiais constituintes do CBUQ	19
	• Agregados na pavimentação	19
	• Cimento asfáltico de Petróleo (CAP)	20
2.3	ASFALTO BORRACHA (AB)	21
2.4	MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM PAVIMENTOS.....	25
3	METODOLOGIA DA PESQUISA.....	29
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
4.1	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM A ELABORAÇÃO DOS ORÇAMENTOS.....	32
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	36
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37
	ANEXOS	40
	ANEXO A – COMPOSIÇÃO DE CUSTOS DO CAP.....	41
	ANEXO B – COMPOSIÇÃO DE CUSTOS DO ASFALTO-BORRACHA	43

1 INTRODUÇÃO

A finalidade de uma rodovia é prover um meio seguro, confortável e econômico para o transporte de pessoas e mercadorias como também possibilitar a abertura de novos horizontes para o desenvolvimento de uma região e permitir a consolidação da economia regional (CNT, 2007).

País com transporte predominantemente rodoviário, o Brasil, que transporta 61% de sua carga e 95% de seus passageiros por estradas rodoviárias, percebe-se que a melhoria do sistema viário é urgente não apenas para quem exerce a atividade do transporte, mas para todos os setores da economia e da sociedade em geral, que dela dependem para alcançar níveis satisfatórios de desenvolvimento (CNT, 2019).

De forma geral, pode-se verificar que em muitos pavimentos, após um curto período de tempo, os defeitos começam a aparecer na superfície de rolamento, causando desconforto, reduzindo a segurança e aumentando os custos para os usuários. Sendo os principais defeitos a fadiga e trilhas de roda, que são causadas justamente pela baixa resistência ao cisalhamento do asfalto convencional. E foi a partir desse problema que surgiu a possibilidade de melhorar o asfalto com borracha ao ligante melhorando assim sua resistência (NEVES FILHO, 2004).

Com o elevado crescimento da frota de veículos no Brasil, ocorreu um grande aumento na produção de pneus que, conseqüentemente, gerou um maior número de pneus inservíveis descartados incorretamente no meio ambiente, ocasionando assim um grande problema ambiental, pois eram descartados de forma inapropriada em rios, ruas, lixões, matas e se tornavam um grande problema para o meio ambiente e para a sociedade.

O primeiro impacto positivo no uso de resíduo de borracha em misturas asfálticas está no ambiente, pois a restauração de pavimento com esse tipo de asfalto pode-se usar até mil pneus por quilômetro, o que reduz o depósito desse material em aterros ou fora deles.

A produção do asfalto borracha (AB) teve início na década de 40, quando a Companhia de Reciclagem de Borracha, U.S. Rubber Reclaiming Company, introduziu no mercado a Ramflex, produto composto por material asfáltico e borracha desvulcanizada reciclada. Em 1845, o norte-americano Charles Goodyear descobriu acidentalmente que a borracha cozida com enxofre a altas temperaturas mantinha as condições necessárias de elasticidade para fabricação de pneus. A partir de então os pneus de borracha foram substituindo as rodas de madeira e ferro, usadas em carroças e carruagens, o que tornou o transporte mais confortável, seguro e funcional (BERNUCCI, et al., 2010).

Entre as suas potencialidades industriais, além de ser mais resistente e durável, a borracha absorve melhor o impacto das rodas com o solo, o que torna o transporte muito mais prático e confortável. (BERNUCCI, et al., 2010).

Pesquisar e entender o Concreto Betuminoso Usinado à Quente (CBUQ) obtido com a incorporação do resíduo de borracha, com relação os efeitos no orçamento e na execução em rodovias, como também suas propriedades relacionadas ao desempenho quando comparado com o asfalto convencional, torna-se importante a medida que percebe-se a relevância do tema. E com isso se percebe que uma escassez de pesquisa que relacione as propriedades que beneficiam o asfalto borracha em relação ao CBUQ convencional. Partindo dessa premissa, esse trabalho se propõe a realizar estudo da influência, no orçamento do CBUQ, a partir da incorporação do resíduo de borracha.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Realizar estudo comparativo entre o orçamento do CBUQ convencional e o CBUQ obtido com incorporação de resíduo de borracha.

1.1.2 Objetivos específicos

- Realizar um levantamento bibliográfico sobre os conceitos básicos que contemplam a teoria do asfalto concreto betuminoso usinado à quente (CBUQ).

- Estudar na literatura o resíduo de borracha e sua utilização na usinagem do CBUQ, com ênfase na interferência em desempenho, viabilidade econômica e propriedades mecânicas.

- Planejar e elaborar o orçamento do CBUQ para utilização em trecho da BR – 427 do km 0 ao km 100 mas sendo fracionado os seguimentos, no Estado do Rio Grande do Norte, considerando, pavimento com CBUQ convencional e com resíduo de borracha.

- Verificar, através da análise do orçamento, o custo/benefício da utilização do resíduo de borracha no projeto de pavimentação.

- Realizar uma análise técnica-econômica da utilização de resíduos na mistura asfáltica.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Tipos de pavimentos

O pavimento é a estrutura projetada para suportar impactos provocados pelo tráfego de veículos automotores, variações climáticas e chuvas, oferecendo, assim condições de conforto e segurança aos usuários (CNT, 2007).

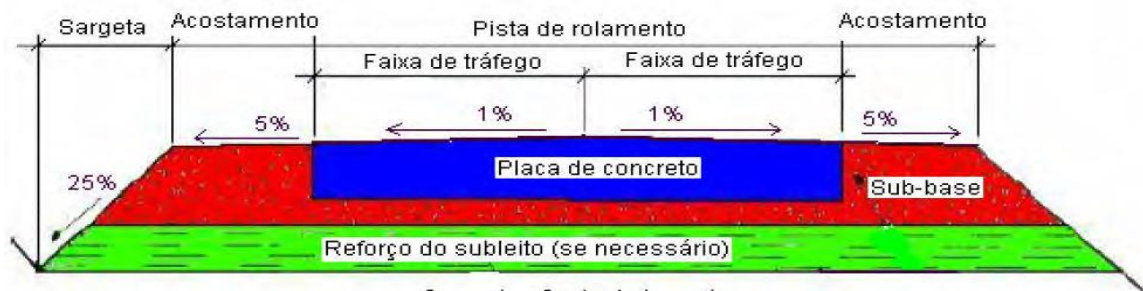
Com a aproximação do fim de sua vida útil, o pavimento passa a não ter a capacidade oferecer uma boa qualidade às pessoas que o utilizam. A composição da fundação do pavimento, como o revestimento, a base, a sub-base e o subleito, assim como as devidas ações de manutenção e restauração, estão sujeitos ao tipo de revestimento empregado (FERRARA, 2006). Dessa forma, os pavimentos são classificados em três grupos: os pavimentos rígidos, semi-rígidos (semiflexíveis) e flexíveis.

2.1.1 Pavimentos rígidos

São compostos por uma placa de concreto que essencialmente absorve a solicitação em sua totalidade, disseminando-a em uma ampla área. Ao alcançar o subleito, a carga apresenta-se devidamente amortecida. Esse tipo de pavimento é composto fundamentalmente pelas seguintes camadas: subleito, base e revestimento (BERNUCCI ET AL, 2008).

Ainda de acordo com Bernucci et al (2008), os pavimentos do tipo rígidos, geralmente associados aos de concreto feitos com concreto-cimento, são aqueles em que o revestimento é uma placa de concreto de cimento Portland. Nesse tipo de pavimento a espessura é determinado de acordo com a resistência à flexão das placas de concreto, assim como as das resistências das demais camadas subjacentes. Já as placas de concreto, se necessário, tem a possibilidade de serem armadas com barras de aço. É comum referir-se a subcamada de um pavimento rígido como sub-base, já que essa camada tem qualidade equivalente à sub-base de pavimentos flexíveis. Na Figura 1 tem-se uma ilustração do pavimento rígido com detalhe para suas partes constituintes.

Figura 1 – Esquema da seção transversal do pavimento rígido.



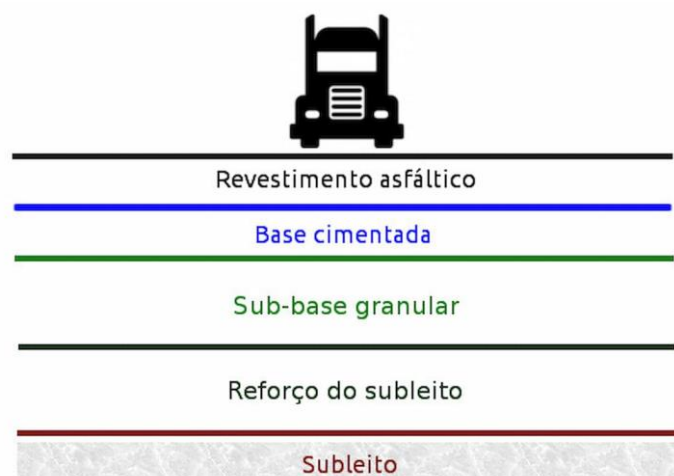
Fonte: DNIT, 2006 (adaptado pelo autor).

2.1.2 Pavimentos semi-rígidos

É o tipo de pavimento que se encontra em uma circunstância intermediária entre os tipos rígidos e os tipos flexíveis. É um pavimento composto por revestimento asfáltico e base de solo-cimento, solo-cal entre outras, que proporciona uma leve melhoria em características como a resistência à tração (FERRARA, 2006).

De acordo com Balbo (2007), entre profissionais e, até mesmo, acadêmicos, eventualmente, o uso do termo “semiflexível” é contestado. Na intenção de se conseguir uma definição das camadas de acordo com as suas funções específicas e distingui-las das demais, é fundamental se utilizar medidas obtidas em laboratórios e metodologia teórica para os cálculos. Na Figura 2, ilustra-se cada camada deste tipo de pavimento.

Figura 2 – Esquema da seção transversal do pavimento semi-rígido.



Fonte: DNIT, 2006 (adaptado pelo autor).

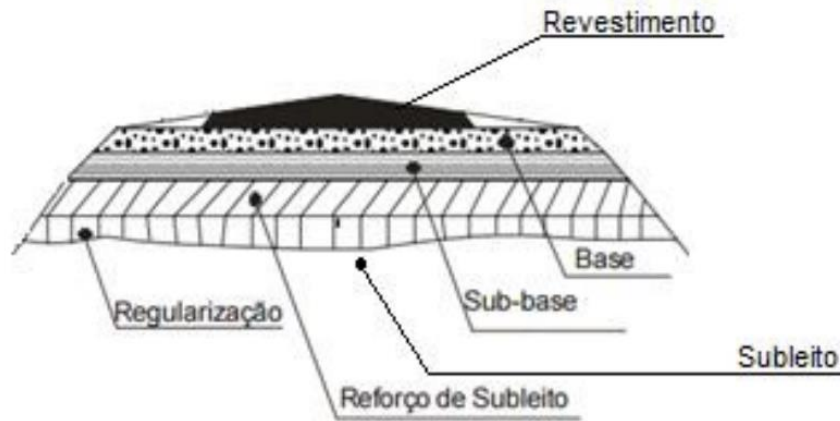
2.1.3 Pavimentos flexíveis

Os pavimentos flexíveis possuem seu revestimento composto por camada superficial asfáltica, apoiada sobre camadas de base, de sub-base, de reforço do subleito (quando necessário) e de subleito, constituídas por materiais granulares, solos ou misturas de solos. Existe também a possibilidade de não utilização de uma destas camadas, porém, só poderá acontecer se a justificativa da sua extinção for baseada em cálculos que comprovem que o volume de tráfego, capacidade de suporte das camadas, suas espessuras e rigidezes dão condições para tal (BERNUCCI, 2007). As camadas constituintes do pavimento flexível, de acordo com DNIT (2006) e considerando as definições dos diversos constituintes do pavimento são:

- a) Subleito – terreno de fundação do pavimento;
- b) Regularização – é a camada incluída sobre o Subleito com objetivo de compatibilizar transversal e longitudinalmente de acordo com as especificações de projeto. Não é necessariamente uma camada de pavimento, podendo ser um corte de regularização;
- c) Reforço do subleito – camada de espessura constante, de acordo com a necessidade, posta acima da camada de Regularização, com características geotécnicas superiores ao material da Regularização do Subleito;
- d) Sub-base – camada imediatamente acima do Reforço do subleito com objetivo de complementar a camada de base, quando não for recomendável implantar a base diretamente sobre o Reforço do subleito;
- e) Base – camada com objetivo de resistir e distribuir os esforços derivados do tráfego e sobre a qual se acomoda o revestimento;
- f) Revestimento – considerada a camada mais nobre do pavimento, é a camada tanto quanto possível impermeável, que recebe diretamente as forças de ação do rolamento dos veículos, com objetivo de prover maior comodidade e segurança aos usuários, resistindo também aos desgastes.

Na Figura 3 ilustra-se esse tipo de pavimento, com destaque para suas principais camadas.

Figura 3 – Esquema de seção transversal do pavimento.



Fonte - DNIT, 2006 (adaptado pelo autor).

2.2 Concreto Betuminoso Usinado a Quente (cbuq)

Para o DNIT (2006, p.3), o CBUQ é uma mistura executada em usina apropriada a quente, composta de agregado graduado, material de enchimento, se necessário, e cimento asfáltico, deve ser espalhada e rolada a quente.

Para Balbo (2007), o CBUQ, pode ser considerado a mais tradicional e comum mistura asfáltica flexível a quente usada no Brasil, utilizados em revestimentos de pavimentos como capas de rolamento e camadas de ligação.

Conforme Pinto e Preussler (2002), o CBUQ deve atender características especiais, recebendo algumas designações:

- Camada de rolamento ou capa asfáltica: última camada a executar, sendo ela a superior da estrutura, responsável por receber diretamente a ação do tráfego. A mistura aplicada deve apresentar estabilidade e flexibilidade, compatíveis com o funcionamento da estrutura e condições de rugosidade, para garantir segurança ao tráfego, mesmo com diferentes condições climáticas e geométricas.
- Camada de ligação ou *binder*: camada posicionada abaixo da capa final, possuindo agregados de maior diâmetro máximo, maior porcentagem de vazios e menor relação betume e vazios.

- Camada de nivelamento ou regularização: Executado com massa asfáltica de graduação fina, com função de corrigir deformações ocorrentes na superfície de um pavimento asfáltico antigo, e assim promover a selagem de fissuras existentes.

2.2.1 Materiais constituintes do CBUQ

É normalmente composto por um agregado miúdo (areia), agregado graúdo (brita) e um ligante (CAP - Cimento Asfáltico de Petróleo), obtido da destilação fracionada do petróleo. Nos itens seguintes serão descritas as principais características desses materiais.

- *Agregados na pavimentação*

Os agregados podem ser oriundos de várias fontes e quando relacionados a área da pavimentação, eles são classificados de acordo com sua natureza (natural, artificial e reciclado), seu tamanho (graúdo, miúdo e material de enchimento) e sua distribuição de grãos/granulação (bem-graduada, aberta, uniforme e descontínua). De acordo com a classificação encontrada, será indicada a utilização que mais se adequa ao agregado encontrado (BERNUCCI et al., 2006).

Para classificar qual o tipo de agregado utiliza-se o método de peneiramento, que é aquele colocado em peneiras de tamanhos diferentes para posteriormente definir o tamanho/granulometria.

Quando a dimensão do material encontrado é maior que 2,0mm, o mesmo é considerado graúdo, sendo assim retido na peneira número 10 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011; BERNUCCI et al., 2006).

Menores que os graúdos (2mm) eles se classificam como um material com dimensões maiores que 0,075mm. Consequentemente passando pela peneira número 10 e ficando retido na de número 200 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011; BERNUCCI et al, 2006).

Por fim tem-se o material de enchimento, denominado de filler. Este é o material onde pelo menos 65% das partículas é menor que 0,075mm, correspondente à peneira de número 200, e.g., cal hidratada, cimento Portland etc. (BERNUCCI, et al, 2006).

- *Cimento asfáltico de Petróleo (CAP)*

Os cimentos asfálticos são compostos por 25 a 40% de petróleo e são produzidos no processo de destilação. É um material com características impermeabilizantes e aglutinantes, possuindo características de durabilidade e flexibilidade a baixas temperaturas (ROHDE, 2007).

No mundo existem cerca de 1500 fontes de petróleo exploradas, porém somente algumas destas são consideradas como um material de qualidade para se produzir ligantes asfálticos. No Brasil e em outros países são incomuns as produções de ligantes asfálticos a partir de um único petróleo, sendo mais habituais as refinarias produtoras de asfalto que utilizam a mistura de diversos petróleos. A sua composição química influencia no desempenho físico e mecânico do CAP e pode variar com a fonte do petróleo e com as modificações que podem ser realizadas (BERNUCCI et al., 2006).

São produzidas pela Petrobrás no Brasil aproximadamente 2 milhões de toneladas de cimento asfáltico de petróleo por ano, que são utilizados principalmente na construção de pavimentos (LEITE, 1999).

O CAP apresenta um comportamento com característica viscosa, sendo conhecido por diminuir a rigidez após longos períodos de carga e exposição térmica, a qual altera as propriedades do mesmo (ODA, 2000). Apresenta em sua constituição de 90 a 95% de hidrocarbonetos e de 5 a 10% de heteroátomos, como o oxigênio, enxofre, nitrogênio e metais. No Brasil, apresentam nessa mistura baixo teor de enxofre e de metais, e alto teor de nitrogênio (LEITE, 1999; BERNUCCI et al., 2006).

Por meio do Cimento Asfáltico de Petróleo é produzido o Concreto Betuminoso Usinado a Quente, um revestimento flexível resultante da mistura a quente, em usina apropriada, de agregado graúdo, agregado miúdo, eventualmente um material de enchimento, como o fíler, e o ligante CAP, tendo como base proporções definidas previamente em laboratório. Tem como característica a operação de mistura ser antecedido pelo aquecimento de seus componentes a temperaturas elevadas entre 140° C e 180° C, e sua disposição e compactação na pista serem também precedidas de aquecimento (temperaturas entre 80° C e 140° C) (BONET, 2002).

De acordo com a norma DNIT 031, (BRASIL, 2006) podem ser empregados os seguintes tipos de cimento asfáltico de petróleo: CAP-30/45; CAP-50/70; CAP-85/100.

A nomenclatura do CAP é indicada por o quanto em décimos de milímetros, uma agulha padronizada penetra em uma amostra, para isso é feito um ensaio de penetração de acordo com

a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007) na NBR 6576 na qual as condições são: agulha com 100g, a uma temperatura de 25 °C e um tempo de 5 s. Para o CAP 50/70, esse par de números determina o limite mínimo 50 e máximo 70 que são permitidos para a penetração (PIZZORNO, 2010).

2.3 Asfalto borracha (AB)

Historicamente o asfalto-borracha começou na década de 40, quando a Companhia de Reciclagem de Borracha, U.S. Ruber Reclaiming Company, introduziu no mercado um produto composto de material asfáltico e borracha desvulcanizada reciclada denominada Ramflex™ (WICKBOLDT, 2005).

Nos Estados Unidos, Charles H. McDonald é considerado o pai do sistema de asfalto-borracha. Em 1963 iniciou uma pesquisa com o objetivo de desenvolver, através da incorporação de borracha moída, um material “altamente elástico” com finalidade de aplicação na manutenção de pavimentos asfálticos. Este produto desenvolvido por McDonald era composto de ligante asfáltico e 25% de borracha de pneus, sendo utilizado em remendos e selante de trincas (ODA e FERNANDES JÚNIOR, 2001).

De acordo com Specht e Ceratti (2003), em agosto de 2001 na Rodovia BR116 no Rio Grande do Sul foi realizada a primeira aplicação de concreto asfáltico com asfalto borracha por via úmida no país. Com aproximadamente dois quilômetros, localizados próximos a cidade de Guaíba entre os quilômetros 318 e 320 desta rodovia, esta aplicação foi realizada pela parceria entre a Metrovias, a Greca Asfaltos e a UFRGS.

De acordo com Specht e Ceratti (2003) com o intuito de baratear as modificações realizadas nos ligantes asfálticos e, juntamente a isto, dar fim aos pneus inservíveis, surgiu o ligante modificado por borracha de pneus ou asfalto-borracha, que possui as seguintes vantagens técnicas comparadas aos ligantes mais usuais (Figura 4):

Figura 4: Vantagens do AB.



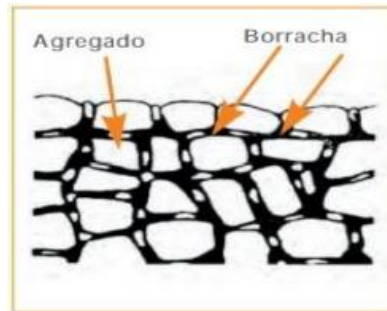
Fonte: Specht e Ceratti (2003).

O asfalto borracha (AB) é constituído pelos mesmos materiais que compõem o CBUQ com a adição da borracha triturada que pode ser implementada de duas formas diferentes, via seca e via úmida. (WICKBOLDT, 2005).

Através da via seca a borracha é introduzida diretamente no misturador da usina de asfalto. Neste caso a borracha entra como um agregado na mistura. A transferência de propriedades importantes da borracha ao ligante é prejudicada, embora seja possível agregar melhorias à mistura asfáltica, desde que na sua fabricação seja possível obter uma mistura homogênea. No processo seco, os grânulos da borracha representam de 0,5 a 3,0% da massa do

agregado. Após a incorporação será adicionado o ligante asfáltico na mistura posteriormente formando o concreto asfáltico modificado com adição de borracha.

Figura 5 – Esquema de fabricação do asfalto-borracha por via seca.



Fonte: Adaptado de Bernucci et al. (2006).

Pela via úmida a borracha é previamente misturada ao ligante, modificando-o permanentemente. Nesta modalidade ocorre a transferência mais efetiva das características de elasticidade e resistência ao envelhecimento para o ligante asfáltico original. No processo úmido o pó de pneu representa aproximadamente 15% da massa do ligante ou menos que 1,5% da massa da mistura.

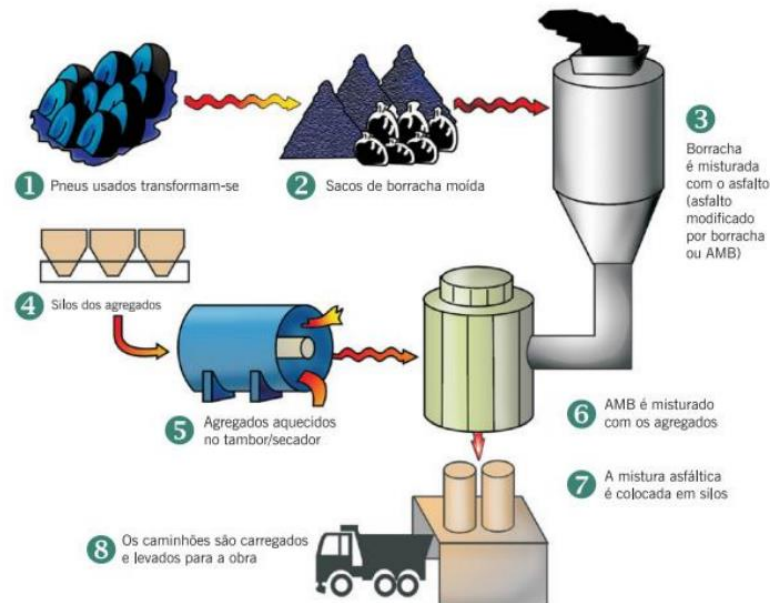
No processo que se é reutilizado por via úmida, são misturados pequenos pedaços finos de borracha ao ligante asfáltico já aquecido, produzindo assim o ligante asfalto-borracha. Ao incorporar borracha em ligantes asfálticos se produz diversas mudanças nas características deste asfalto. O material a ser modificado é o Cimento Asfáltico de Petróleo – CAP, o qual é obtido por destilação de petróleo (ANTT – AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES, 2017).

Por via úmida, a depender do processo de fabricação, pode-se obter o ligante modificado estocável ou não-estocável. “Continuous blending” é o nome conhecido pelo tipo não-estocável, produzido na própria obra com equipamento misturador. Nesse estado, o asfalto modificado deve ser aplicado de imediato em virtude de sua instabilidade, conferindo ao mesmo diferentes características do estocável (BERTOLLO et al., 2002; MORILHA JÚNIOR, 2004).

De acordo com Departamento de Infraestrutura de Transportes (2009), diz que ao realizar o processo por via úmida do tipo “Terminal Blending”, se obtém o asfalto-borracha estocável, sendo os componentes misturados em um terminal especial a altas temperaturas por agitação em alto cisalhamento, o que resulta em ligantes estáveis e relativamente homogêneos. Deve possuir na incorporação ao ligante asfáltico teor mínimo de borracha de 15% como referência em peso. Através deste processo de fabricação, obtém-se a despolimerização e a desvulcanização da borracha de pneu, permitindo assim a reação desta borracha com as

moléculas do CAP, que causa uma menor viscosidade do produto final (BERNUCCI, et al., 2006). A Figura 6 ilustra o processo viú úmida.

Figura 6 – Esquema de fabricação do asfalto-borracha por via úmida.



Fonte: Bernucci et al. (2006).

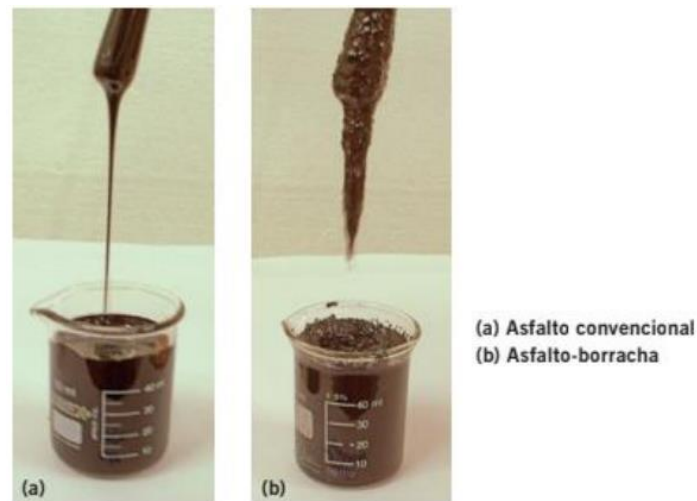
Segundo Wickboldt (2005) algumas das propriedades físico-químicas aprimoradas são, o aumento da resistência à ação química de óleos e combustíveis, a diminuição da suscetibilidade térmica, o aumento da deformação da tração admissível (melhorando o comportamento à fadiga), aumento da deformação elástica instantânea e a diminuição da deformação permanente (ângulo de defasagem).

E segundo Rodrigues (2005) outras grandes vantagens são o aumento da vida útil do pavimento, maior resistência à propagação de trincas e a formação de trilhas de roda, permite a redução de espessura do pavimento e redução do ruído provocado pelo tráfego entre 65 e 85%.

Ao adicionar borracha ao cimento asfáltico, acarreta-se um aumento significativo na viscosidade do ligante modificado. A temperatura em que ocorre a reação de incorporação do asfalto e as partículas de borracha também influenciam a viscosidade. Um ligante com viscosidade elevada produz misturas asfálticas de baixa trabalhabilidade e difícil compactação (EPPS, 1994 apud SALINI, 2000).

A Figura 7 a seguir demonstra a maior consistência do asfalto-borracha em comparação ao asfalto convencional no momento da usinagem.

Figura 7 – Exemplo de consistência do asfalto-borracha.



Fonte: Bernucci et al. (2006).

2.4 Manifestações patológicas em pavimentos

O CBUQ é um tipo de material bastante utilizado em reparos de pavimentos. Esses reparos são para restabelecer as condições de tráfego de rodovias afetadas por algum tipo de manifestação patológica. Essas estão relacionadas com as estruturas, dos pavimentos, efeitos do tráfego, condições atmosféricas e outros fatores que são responsáveis pela degradação dos pavimentos.

Conforme Bernucci (2007), o pavimento asfáltico atualmente pode apresentar diversas manifestações patológicas que podem ser apresentadas na superfície ou no interior da rodovia, normalmente são danos ou deteriorações do pavimento asfáltico que podem ser identificados a olho nu. Podem ser do tipo trincas, afundamentos, escorregamentos dos revestimentos, desgastes e desagregações, panelas, deslocamentos e segregações.

O levantamento dessas manifestações possui a finalidade de avaliar o estado de conservação dos pavimentos asfálticos, permitindo um diagnóstico da situação funcional para custear a solução tecnicamente adequada e, em caso de necessidade, indicar a melhor ou melhores alternativas de restauração do pavimento. No Quadro 1 são apresentadas as principais manifestações patológicas que afetam os pavimentos flexíveis, destacando suas principais causas.

Quadro 1 – Principais manifestações patológicas que afetam os pavimentos flexíveis.

Manifestação patológica	Causas
Trincas curtas longitudinais	Falhas na execução, na temperatura de compactação ou mesmo na dosagem da mistura asfáltica. Envelhecimento de ligante asfáltico.
Trincas longitudinais longas	Falhas executivas, recalques diferenciais. Podem também aparecer junto à trilha de roda ou como falha de juntas longitudinais de diferentes frentes de compactação. Envelhecimento do ligante asfáltico.
Trincas de retração	Trincas decorrentes da reflexão de trincas de placas de concreto de cimento Portland ou de trincas preexistentes.
Trincas de bloco com erosão	Trincas de bloco em tratamento superficial decorrentes de reflexão de trincas em solo-cal da base, com erosão junto às bordas.
Trincas de bloco sem erosão	Trincas de bloco decorrentes de reflexão das trincas em solo-cimento da base.
Trincas tipo couro de jacaré com erosão	Várias causas podem gerar o trincamento jacaré, entre elas: ação da repetição de cargas do tráfego; ação climática – gradientes térmicos; envelhecimento do ligante e perda de flexibilidade seja pelo tempo de exposição seja pelo excesso de temperatura na usinagem; compactação deficiente do revestimento; deficiência no teor de ligante asfáltico; subdimensionamento; rigidez excessiva do revestimento em estrutura com elevada deflexão; reflexão de trincas de mesma natureza; recalques diferenciais; entre outros. Podem aparecer em trilhas de roda, localizadamente, junto às bordas ou de forma generalizada.
Trincas tipo couro de jacaré sem erosão	
Conjunto de trincas longitudinais longas	Trincas decorrentes da ação de umedecimento da base por infiltração de água pelos acostamentos não protegidos e ação conjunta do tráfego.
Trinca de retração térmica	Trinca de retração térmica em ambientes sujeitos a baixas temperaturas.

Afundamento por consolidação em trilha de roda	Afundamento decorrente de densificação ou ruptura por cisalhamento de camadas subjacentes ao revestimento; pode também ocorrer por descolamento de película de asfalto junto ao agregado (stripping); em geral desenvolvem-se trincas dentro das trilhas de roda ou à sua borda. Em geral sem compensação volumétrica lateral, a não ser em alguns casos de ruptura por cisalhamento.
Afundamento por consolidação localizado	Problemas ou deficiências construtivas, falhas de compactação, presença de solo “borrachudo”; problemas de drenagem; rupturas por cisalhamento localizadas; em geral desenvolvem-se trincas nas depressões.
Afundamento plástico nas trilhas de roda	Falha na dosagem de mistura asfáltica – excesso de ligante asfáltico; falha na seleção de tipo de revestimento asfáltico para a carga solicitante; em geral com sollevamento lateral – compensação volumétrica junto à depressão.
Escorregamento de massa	Escorregamento de massa asfáltica por fluência decorrente de excesso de ligante; em geral junto às depressões localizadas, às trilhas de roda e às bordas de pavimentos.
Escorregamento do revestimento	Escorregamento do revestimento asfáltico por falhas construtivas e de pintura de ligação; difere do escorregamento de massa por fluência do subitem Trinca de retração anterior.
Corrugação	Corrugação devido à fluência da massa asfáltica – comprimento de onda da ordem de centímetros a dezenas de centímetros; em geral ocorre em área de aceleração ou desaceleração, rampas sujeitas ao tráfego de veículos pesados e lentos, curvas, entre outros locais. Não se deve confundir com a ondulação causada por adensamento diferencial do subleito que provoca comprimentos de onda da ordem de metros.
Afundamento por consolidação em trilha de roda e afundamento por consolidação localizado	Falhas de dosagem provocando excesso de ligante em alguns pontos ou de maneira generalizada; pode ocorrer por segregação de massa, com concentração de ligante em alguns pontos e falta em outros; ou ainda por cravamento de agregados em base e ascensão de ligante à superfície.
Desgaste e desagregação	Falhas de adesividade ligante-agregado (stripping); presença de água aprisionada e sobrepressão em vazios da camada de revestimento gerando descolamento de ligante (stripping); problemas de dosagem – deficiência no teor de ligante; falhas de bico em tratamentos superficiais; problemas executivos ou de projeto de misturas – segregação de massa asfáltica.

Deslocamento mais perda de agregados	Problemas na adesividade ligante asfáltico-agregado provocando o descolamento e remoção dos agregados pelo tráfego; agregados com baixa resistência mecânica ou química.
Polimento de agregado	Seleção deficiente de agregados – problemas de adesividade somados à potencialidade de polimento das superfícies dos agregados pela ação dos pneus de veículos.
Panela atingindo abase	Local onde havia trincas interligadas e com a ação do tráfego e intempéries houve remoção do revestimento ou mesmo de parte da base; falha construtiva – deficiência na compactação, umidade excessiva em camadas de solo, falha na imprimação; desagregação por falha na dosagem, stripping ou ainda segregação.
Panela sem atingir abase	Falha na pintura de ligação em camadas de revestimento causando o destacamento ou “despelamento”.
Segregação	Concentração de agregados em uma área e de mástique em outras, resultado da deficiência de ligante em alguns locais e excesso em outros; problemas na definição de faixa granulométrica da mistura, problemas de usinagem, problemas diferenciais de temperatura de distribuição e compactação. Pode ser classificado como desgaste remendo bem executado.
Bombeamento de finos	Subida à superfície por meio de fendas de material fino devido à presença de água sob pressão causada pela ação do tráfego e rapidamente aliviada após solicitação provocando a ascensão dos finos.
Falha de bico espargidor	Falha nos bicos espargidores em tratamentos superficiais, em geral com falta de ligante asfáltico provocando deficiência de cobertura e envolvimento dos agregados e seu consequente desprendimento.
Recalque diferencial	Falhas construtivas de compactação, adensamento diferencial causado por alterações substanciais no material da fundação, alargamentos de faixas com preexistência de pistas anteriores.

Fonte: Adaptado de BERNUCCI (2007).

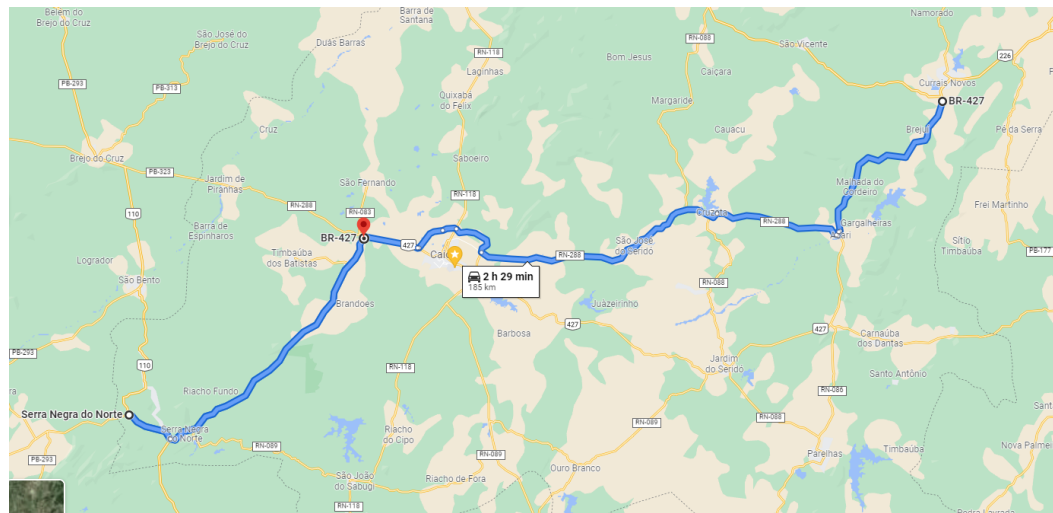
3 METODOLOGIA DA PESQUISA

3.1 Descrição do trecho da rodovia pesquisada

Para a elaboração do orçamento do pavimento convencional CBUQ, com e sem resíduo de borracha, será utilizado o trecho da BR 427 (começando em Currais Novos/RN e indo até a divisa com a Paraíba) (Figura 8).

O trecho em questão tem uma extensão de 162 km, que se inicia na cidade de Currais Novos/RN, e se estende até a divisa com a Paraíba logo após Serra Negra/RN. No entanto, os reparos serão realizados numa extensão de 20 km, que está dividido em pequenos trechos ao longo da rodovia.

Figura 8 – Extensão da BR 427.



Fonte: Google Maps. (2021).

3.2 Elaboração do orçamento do CBUQ com resíduo de borracha (Asfalto Borracha)

Para a elaboração do orçamento do CBUQ com resíduo de borracha foi necessário realizar uma pesquisa para ser definido o teor a ser substituído em relação ao CBUQ de referência.

Através dos estudos bibliográficos, analisou-se a viabilidade econômica do uso da borracha, através do processo de via úmida, mostrando as características apresentadas no asfalto após a incorporação da mesma. Foi analisado também o CBUQ com a utilização do CAP como ligante, deste modo efetivando uma comparação técnica dos dois tipos de ligantes.

O orçamento foi calculado usando o método via úmida, visto que suas vantagens são mais abrangentes, como, maior resistência a fissuras, maior viscosidade, maior ductibilidade, resistência ao envelhecimento.

3.2.1 Definição da composição utilizada de resíduo de borracha

Efetuuou-se um estudo econômico comparativo entre o asfalto-borracha e o asfalto convencional (CBUQ) ao longo de uma faixa de 20 km de comprimento da rodovia em estudo. Para isso, foi realizada uma coleta de dados do custo unitário direto total dos revestimentos utilizados nesta pesquisa, o CAP 50/70 e o asfalto-borracha, encontrados no programa Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO), denominados respectivamente como: Usinagem de concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais e Usinagem de concreto asfáltico com borracha - faixa C - brita comercial, tendo como referência as planilhas de Rio Grande do Norte em abril de 2021.

Em sequência, esses dados foram inseridos em um modelo de Tabela da Greca Asfaltos, que foi adaptado pelo autor deste trabalho, descrevendo os custos de execução e os cálculos necessários para determinar o custo total da obra e posteriormente a comparação entre os valores dos dois revestimentos e a porcentagem da redução de custo do CBUQ com asfalto-borracha em substituição ao CAP 50/70.

A largura da pista, sem considerar o acostamento, foi de 6,10 m, sendo duas faixas com 3,05 m cada. Segundo os dados retirados do Projeto CREMA (2015) de Rio Grande do Norte, foi considerada para os dois revestimentos uma densidade de 2,4 t/m³.

De acordo com Greca Asfaltos (2009) estudos nacionais e internacionais comprovam que pode ser realizada a redução de até 50% na espessura da camada, pois a resistência à propagação de trincas e a formação de trilhas de roda é maior no revestimento de asfalto-borracha em relação ao CAP convencional e tomando isso como base, nesta comparação foi reduzida 30% para não ficar uma camada muito fina, obtendo um valor de 3,5 cm.

Os dados utilizados nos pavimentos com CBUQ e com Asfalto-borracha, que serão necessários para os cálculos, estão dispostos na Quadro 2.

Quadro 2 – Dados utilizados para elaboração dos orçamentos.

Dados	CBUQ de Referência	Asfalto Borracha
Espessura	5 cm	3,5 cm
Extensão	20 Km	20Km
Largura	6,10 m	6,10 m
Densidade	2,4 t/m ³	2,4 t/m ³

Fonte: Autoria própria (2021).

A seguir, o fluxograma apresenta e detalha as etapas seguidas para realização do orçamento.

Figura 9: Fluxograma das etapas do orçamento.

Fonte: Autoria própria (2021).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Apresentação e discussão dos resultados obtidos com a elaboração dos orçamentos

Para se calcular a quantidade de massa asfáltica fez-se necessário converter as unidades de cada dado em metros e posteriormente multiplicar esses valores, assim obtendo a quantidade em tonelada para cada tipo de revestimento, os valores foram retirados do quadro 2, como consta no Quadro 3.

Quadro 3 – Quantidade de massa asfáltica dos dois materiais em estudo.

Revestimento - CBUQ (convencional)	Revestimento - asfalto-borracha
$20000m \times 6,10m \times 0,05m \times 2,4t/m^3 =$ 14.640,00 toneladas de massa asfáltica de CBUQ	$20000m \times 6,10m \times 0,035m \times 2,4t/m^3 =$ 10.248,00 toneladas de massa asfáltica de asfalto-borracha
14.640,00 TONELADAS	10.248,00 TONELADAS

Fonte: Autoria própria (2021).

Na determinação da massa asfáltica foram utilizados os dados do SICRO com base em abril/2021 do estado do Rio Grande do Norte, dos custos unitários de referência, foram coletados dos itens Usinagem de concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais e Usinagem de concreto asfáltico com borracha - faixa C - brita comercial. Utilizou-se a faixa C por possuir um material com a granulometria adequada para aplicação em camada de rolamento, de acordo com a Norma DNIT 031 (BRASIL, 2006).

No Quadro 4, estão apresentados os custos horários referentes aos equipamentos utilizados e a mão de obra, juntamente com o teor dos ligantes, esse sendo o mesmo nas duas composições com 5,65%, porém uma com 15% desse teor composta por borracha, ou seja aproximadamente 0,85%.

Quadro 4 – Custos horários totais de execução.

Valor do CAP 50/70 (R\$/tonelada)	Preço Asfalto-borracha (R\$/tonelada)	Teor de Ligante (%)
1.552,48	1.501,60	5,65

Fonte: adaptado SICRO (2021).

Observa-se que o custo do asfalto borracha é relativamente menor, pois como ele é aplicado um espaço de tempo menor, por isso seu custo horário é mais barato.

Já no Quadro 5, são apresentados os custos unitários totais por tonelada, que é composto por todos os insumos e o serviço de aplicação da massa, observando-se nele que o custo unitário do asfalto borracha é aproximadamente 3,38% mais barato que o CAP 50/70.

Quadro 5 – Custos unitários direto totais.

CBUQ – CAP 50/70 (R\$/tonelada)	129,27
CBUQ – Asfalto-borracha (R\$/tonelada)	135,3

Fonte: adaptado SICRO (2021).

De acordo com o que observamos no Quadro 5, o valor de execução do asfalto borracha é 10% mais caro que o preço de execução do CBUQ – CAP50/70. Esse aumento equivale aos custos para elevar as temperaturas de usinagem da mistura asfáltica e para aumentar a qualidade na compactação. E também a incorporação da borracha na ligante torna-o mais caro, além do fato do maquinário ser mais caro.

O Quadro 6, elaborado de acordo com um modelo encontrado no manual da Greca Asfaltos (2009), define o custo total da obra, de acordo com os dados obtidos.

Quadro 6 – Descrição de Custos.

	Dados	Cálc.	Und.	CAP 50/70	Asfalto Borracha
1	Qntd. de massa asfáltica CBUQ (produzida)		TON.	14.640,00	10.248,00
2	Custo de Usinagem/Aplicação por tonelada de CBUQ aplicado		R\$/ton	129,27	135,3
3	Qntd. de massa x custo de usinagem/aplicação	1X2	R\$	R\$ 1.892.512,80	R\$ 1.386.554,40
4	Teor de asfalto		%	5,65	5,65
5	Custo de asfalto por tonelada		R\$/ton	1.552,48	1.501,60
6	Custo asfalto no CBUQ	1X4X5	R\$	R\$ 128.414.704,08	R\$ 86.944.482,45
7	Custo total da Obra	3+6	R\$	R\$ 130.307.216,88	R\$ 88.331.036,85

Fonte: adaptado SICRO (2021).

No quadro anterior encontrasse o custo total da obra que pode ser obtido pela soma do custo asfáltico mais quantidade de massa por toneladas aplicada.

Para analisar a porcentagem de redução de custo (R_c) do asfalto-borracha comparado ao CAP 50/70, utilizou-se da equação (1) a seguir:

$$R_c = \frac{(((\text{Custo total da obra CAP}) - (\text{Custo total da obra Asfalto-Borracha})) * 100)}{\text{Custo total da obra CAP}} \quad (1)$$

$$R_c = \frac{(((130.307.216,88) - (88.331.036,85)) * 100)}{130.307.216,88} = 32,21\%$$

Esta redução de custo de 32,21% basicamente se deve ao fato da redução da camada aplicada do ab em relação ao cbuq convencional. Embora o custo do ab seja maior, quando utilizado desse fator de redução de espessura o seu valor tende a cair, e também através dessa característica o tempo da obra será menor, em vista que necessitara de menos massa asfáltica. O Quadro 7, se refere à economia de substituição do CAP pelo asfalto-borracha.

Quadro 7 – Redução de custo do asfalto borracha em relação ao convencional.

Redução de Custo do CBUQ com o Asfalto borracha em substituição ao CAP 50/70	R\$	41.976.180,02
	%	32,21

Fonte: autoria própria (2021).

Quando esses valores foram analisados através da Equação (1), percebeu-se que a obra com asfalto-borracha é mais econômica 32,21% em relação ao CAP 50/70, representando um valor de 41.976.180,02 reais. Assim, quando em obras de maiores extensões, esse número se torna bastante expressivo. Como foi dito, a possibilidade de diminuir a espessura do revestimento quando utilizado o asfalto-borracha em sua composição, faz com que haja uma maior economia no valor total da obra.

De acordo com Greca Asfaltos (2009), ao reduzir a espessura da camada de revestimento, o que interfere diretamente na quantidade de massa asfáltica a ser utilizada, irá propiciar também a diminuição do uso dos recursos naturais, tais como os agregados e o combustível que seria necessário para a usinagem e transporte da massa.

Além da economia encontrada na fase de execução, como foi citado anteriormente o asfalto-borracha se mostra-se mais resistente a trincas e trilhas de rodas que o asfalto

convencional, isso eleva a sua vida útil fazendo com que se leve mais tempo para que seja necessária ocorrer alguma manutenção. Como afirma Greca Asfaltos (2009), esse tipo de ligante propõe a redução dos custos de conservação por possuir um menor envelhecimento e suportar maiores deformações, assim aumentando a durabilidade do revestimento, havendo também uma diminuição dos intervalos de reparos e restauração do pavimento.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através dos estudos realizados nesta pesquisa, pode-se evidenciar que o uso do asfalto borracha é viável em todos os aspectos abordados, sendo eles ambientais, econômicos, técnico e financeiro. Do ponto de vista econômico, pode-se verificar que o asfalto borracha tem um custo de implantação superior ao asfalto convencional, mas se levado em consideração a suas características de redução do envelhecimento, aumento da flexibilidade, aumento do ponto de amolecimento e redução da susceptibilidade térmica, o asfalto borracha torna-se economicamente viável a longo prazo, pois seus custos com manutenção e reparo serão menores se comparados ao asfalto convencional.

Diante do que foi apresentados, há uma grande vantagem econômica quando se compara os custos totais das obras entre os dois tipos de revestimento. Mesmo com o valor do custo unitário direto por tonelada do asfalto-borracha ser maior que o do convencional, ele se mostra consideravelmente mais econômico no valor total, visto que por possuir resistência elevada, torna-se possível a redução da espessura da camada de revestimento, além de futuramente proporcionar um maior intervalo entre as manutenções devido sua durabilidade.

Ao final do trabalho percebeu-se a necessidade de realização de pesquisas futuras. Desta forma, propõe-se as seguintes sugestões:

- realizado uma comparação do orçamento final da obra e comparar com um orçamento feito através do Sicro.
- realização de ensaios de compactação, para então saber se a redução de espessura realmente é a principal vantagem do AB, em vista da sua viscosidade ser mais densa e com isso piorar a sua compactação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, A. C.; SOUZA, U. E. L. Diferentes abordagens quanto ao orçamento de obras habitacionais: aplicação ao caso do assentamento da alvenaria. **IX Encontro Nacional de Tecnologia do Meio Ambiente Construído**, Foz do Iguaçu: ENTAC, 2002.

ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres. **Asfalto Borracha: Revisão bibliográfica, avaliação reológica do ligante asfáltico e determinação dos parâmetros mecânicos das misturas asfálticas**, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9935: Agregados – Terminologia**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2011.

BERNUCCI, Liedi Bariani; MOTTA, Laura Maria Goretti da; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; SOARES, Jorge Barbosa Soares. **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro, 2007. PETROBRAS: ADEBA, 2008. Disponível em http://www.proasfalto.com.br/pdf/Asfalto_Capitulo_04_Mar2010.pdf. Acesso em 10/08/2021.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica**. Oficina de textos, v. 1, p. 558, 2007.

BERTOLLO, S. M.; FERNANDES JÚNIOR, J. L.; SCHALCH, V. **Benefícios da incorporação de borracha de pneus em pavimentos asfálticos**. In: XXVIII Congresso Interamericano de Ingenieria Sanitaria y Ambiental, 2002, Cancún.

BERTOLLO, Sandra A. et al. Avaliação Laboratorial de Mistura Asfáltica Densa Modificada com Adição de Borracha. **Revista Transportes**, Rio de Janeiro, v. 10, n. 1, p. 65-83, 2002.

BONET, I. D. Valorização do resíduo areia de fundição (RAF). **Incorporação nas massas asfálticas do tipo C.B.U.Q.** 2002. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de pavimentação**. 3. Ed, Rio de Janeiro, 2006

CNT – Confederação Nacional dos Transportes. **Pesquisa Rodoviária**, 2007.

CNT – Confederação Nacional dos Transportes. **Pesquisa CNT de rodovias 2019**, 23. ed. 236 p, 2019.

DNIT. Departamento Nacional de Infra Estrutura de Transporte. **Manual de pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro: IPR, 2006, 274p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Norma DNIT 031: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, p. 4. 2006

FERRARA, Renata D’Avello. **Estudo comparativo do custo x benefício entre o asfalto convencional e o asfalto modificado pela adição de borracha moída de pneu.**

Universidade Anhembi Morumbi. São Paulo, 2006. Disponível em <http://engenharia.anhembi.br/tcc-06/civil-57.pdf>. Acesso em 30/08/2021.

GRECA ASFALTOS. **Linha ECOFLEXPAVE.** 2009. Disponível em: <
https://www.grecaasfaltos.com.br/wp-content/conteudos/publicacoes-greca/estudo-ecoflex_pesquisas-avaliacao-economica-financeira-apelo-ecologico-asfalto-ecologico.pdf
>Acesso em: 30 de setembro. 2021.

LEITE, L. F. M. **Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímero.** 1999. 100 f. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

MORILHA JÚNIOR, A. **Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas.** 2004. 165 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

NEVES FILHO, C. L. D. **Avaliação laboratorial de misturas asfálticas SMA produzidas com ligante asfalto-borracha.** Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, USP – São Carlos-SP, 2004.

ODA, S.; FERNANDES JÚNIOR, J.L. Borracha de pneus como modificador de cimentos asfálticos para uso em obras de pavimentação. **Acta Scientiarum (UEM)**, Maringá, v. 23, 1589-1599 f., 2001.

PINTO, S. PREUSSLER, E. **Pavimentação Rodoviária – Conceitos Fundamentais Sobre Pavimentos Flexíveis.** Rio de Janeiro, 2ª ed. 269p. 2002.

PIZZORNO, Bianca de Sousa. **Efeito do solvente e da temperatura na morfologia superficial do cimento asfáltico de petróleo.** 2010. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

RODRIGUES, R. M. **Estudo do trincamento dos pavimentos.** Rio de Janeiro. Tese de Doutorado em Engenharia – COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 208p. 2005.

ROHDE, Luciana. **Estudo de misturas asfálticas de módulo elevado para camadas estruturais de pavimentos.** 2007. 52 f. Tese (Doutorado). Universidade Federal do rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.

SALINI, R. B. **Utilização de Borracha Reciclada de Pneus em Misturas Asfálticas.** 2000. 120 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

SICRO. Sistemas de Custos Referenciais de Obras. 2021. Disponível em:
<<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro/nordeste/rio-grande-do-norte/2021/abril/abril-2021>>Acesso em: 10 set. 2021.

SPECHT, Luciano Pivoto; CERATTI, Jorge A. Pereira. Asfalto-borracha e borracha-agregado: Possibilidades de utilização de borracha reciclada em misturas asfálticas. **Revista Estradas do DAER**, Porto Alegre, ano 2, nº 4, p. 18-26, julho. 2003.

WICKBOLDT, V. S. **Ensaaios Acelerados de Pavimentos para Avaliação de Desempenho de Recapeamentos Asfálticos** – Dissertação de Mestrado – PPGEC/UFRGS. 134p. 2005.

ANEXOS

ANEXO A – COMPOSIÇÃO DE CUSTOS DO CAP.

CGCIT

DNIT

SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO

Rio Grande do Norte

Custo Unitário de Referência

Abril/2021

Produção da equipe 99,60000 t

6416078 Usinagem de concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais

Valores em reais (R\$)

A - EQUIPAMENTOS		Quantidade	Utilização		Custo Horário		Custo
			Operativa	Improdutiva	Produtivo	Improdutivo	Horário Total
E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	1,00000	1,00	0,00	51,4669	28,3431	51,4669
E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m³ - 113 kW	1,00000	0,80	0,20	135,3743	65,7849	121,4564
E9021	Grupo gerador - 456 kVA	1,00000	1,00	0,00	298,7041	14,3293	298,7041
E9558	Tanque de estocagem de asfalto com capacidade de 30.000 l	2,00000	1,00	0,00	48,5772	32,0022	97,1544
E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	1,00000	1,00	0,00	917,3910	462,5074	917,3910
Custo horário total de equipamentos							1.486,1728
B - MÃO DE OBRA		Quantidade	Unidade	Custo Horário		Custo Horário Total	
P9824	Servente	4,00000	h	16,5761		66,3044	
Custo horário total de mão de obra							66,3044
Custo horário total de execução							1.552,4772
Custo unitário de execução							15,5871
Custo do FIC							-
Custo do FIT							-
C - MATERIAL		Quantidade	Unidade	Preço Unitário		Custo Unitário	
M0028	Areia média	0,32475	m³	100,7778		32,7276	
M0005	Brita 0	0,06245	m³	92,8583		5,7990	
M0191	Brita 1	0,06245	m³	85,8213		5,3595	
M0344	Cal hidratada - a granel	56,20000	kg	0,4015		22,5643	
M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	0,06323	t	0,0000		0,0000	
M1941	Óleo combustível 1A	8,00000	l	4,1155		32,9240	
M1103	Pedrisco	0,13739	m³	91,7472		12,6051	
Custo unitário total de material							111,9795
D - ATIVIDADES AUXILIARES		Quantidade	Unidade	Custo Unitário		Custo Unitário	
Custo total de atividades auxiliares							
Subtotal							127,5666
E - TEMPO FIXO		Código	Quantidade	Unidade	Custo Unitário		Custo Unitário
M0028	Areia média - Caminhão basculante 10 m³	5914647	0,48713	t	1,1400		0,5553
M0005	Brita 0 - Caminhão basculante 10 m³	5914647	0,09368	t	1,1400		0,1068
M0191	Brita 1 - Caminhão basculante 10 m³	5914647	0,09368	t	1,1400		0,1068
M0344	Cal hidratada - a granel - Caminhão silo 30 m³	5914363	0,05620	t	12,4800		0,7014
M1103	Pedrisco - Caminhão basculante 10 m³	5914647	0,20609	t	1,1400		0,2349
Custo unitário total de tempo fixo							1,7052
F - MOMENTO DE TRANSPORTE		Quantidade	Unidade	DMT			Custo Unitário
				LN	RP	P	
M0028	Areia média - Caminhão basculante 10 m³	0,48713	tkm	5914359	5914374	5914389	
M0005	Brita 0 - Caminhão basculante 10 m³	0,09368	tkm	5914359	5914374	5914389	
M0191	Brita 1 - Caminhão basculante 10 m³	0,09368	tkm	5914359	5914374	5914389	
M0344	Cal hidratada - a granel - Caminhão silo 30 m³	0,05620	tkm	5914364	5914365	5914366	
M1103	Pedrisco - Caminhão basculante 10 m³	0,20609	tkm	5914359	5914374	5914389	
Custo unitário total de transporte							
Custo unitário direto total							129,27

Obs:

ANEXO B – COMPOSIÇÃO DE CUSTOS DO ASFALTO-BORRACHA.

CGCIT

DNIT

SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO

Rio Grande do Norte

Custo Unitário de Referência

Abril/2021

Produção da equipe 84,66000 t

6416213 Usinagem de concreto asfáltico com borracha - faixa C - brita comercial

Valores em reais (R\$)

A - EQUIPAMENTOS		Quantidade	Utilização		Custo Horário		Custo Horário Total
			Operativa	Improdutiva	Produtivo	Improdutivo	
E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	1,00000	1,00	0,00	51,4669	28,3431	51,4669
E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m³ - 113 kW	1,00000	0,68	0,32	135,3743	65,7849	113,1057
E9021	Grupo gerador - 456 kVA	1,00000	1,00	0,00	298,7041	14,3293	298,7041
E9074	Tanque de estocagem de asfalto com agitadores de 60.000 l	2,00000	1,00	0,00	27,3143	17,9944	54,6286
E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	1,00000	1,00	0,00	917,3910	462,5074	917,3910
Custo horário total de equipamentos							1.435,2963
B - MÃO DE OBRA		Quantidade	Unidade	Custo Horário		Custo Horário Total	
P9824	Servente	4,00000	h	16,5761		66,3044	
Custo horário total de mão de obra						66,3044	
Custo horário total de execução						1.501,6007	
Custo unitário de execução						17,7368	
Custo do FIC						-	
Custo do FIT						-	
C - MATERIAL		Quantidade	Unidade	Preço Unitário		Custo Unitário	
M0005	Brita 0	0,06275	m³	92,8583		5,8269	
M0191	Brita 1	0,06275	m³	85,8213		5,3853	
M0344	Cal hidratada - a granel	56,47000	kg	0,4015		22,6727	
M3228	Cimento asfáltico CAP 50/70 com 15% de asfalto borracha	0,05882	t	0,0000		0,0000	
M1941	Óleo combustível 1A	14,00000	l	4,1155		57,6170	
M1103	Pedrisco	0,13804	m³	91,7472		12,6648	
M1135	Pó de pedra	0,32627	m³	35,8213		11,6874	
Custo unitário total de material						115,8541	
D - ATIVIDADES AUXILIARES		Quantidade	Unidade	Custo Unitário		Custo Unitário	
Custo total de atividades auxiliares							
Subtotal						133,5909	
E - TEMPO FIXO		Código	Quantidade	Unidade	Custo Unitário	Custo Unitário	
M0005	Brita 0 - Caminhão basculante 10 m³	5914647	0,09413	t	1,1400	0,1073	
M0191	Brita 1 - Caminhão basculante 10 m³	5914647	0,09413	t	1,1400	0,1073	
M0344	Cal hidratada - a granel - Caminhão silo 30 m³	5914363	0,05647	t	12,4800	0,7047	
M1103	Pedrisco - Caminhão basculante 10 m³	5914647	0,20706	t	1,1400	0,2360	
M1135	Pó de pedra - Caminhão basculante 10 m³	5914647	0,48941	t	1,1400	0,5579	
Custo unitário total de tempo fixo						1,7132	
F - MOMENTO DE TRANSPORTE		Quantidade	Unidade	DMT			Custo Unitário
				LN	RP	P	
M0005	Brita 0 - Caminhão basculante 10 m³	0,09413	tkm	5914359	5914374	5914389	
M0191	Brita 1 - Caminhão basculante 10 m³	0,09413	tkm	5914359	5914374	5914389	
M0344	Cal hidratada - a granel - Caminhão silo 30 m³	0,05647	tkm	5914364	5914365	5914366	
M1103	Pedrisco - Caminhão basculante 10 m³	0,20706	tkm	5914359	5914374	5914389	
M1135	Pó de pedra - Caminhão basculante 10 m³	0,48941	tkm	5914359	5914374	5914389	
Custo unitário total de transporte							
Custo unitário direto total							135,30

Obs: