



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL



ALEX MELO

**CONTROLE TECNOLÓGICO DE CONCRETO ASFÁLTICO USINADO A
QUENTE: ESTUDO DE CASO EM UMA USINA DE ASFALTO LOCALIZADA
NO INTERIOR DA BAHIA**

SÃO CRISTÓVÃO – SE

2020

ALEX MELO

**CONTROLE TECNOLÓGICO DE CONCRETO ASFÁLTICO USINADO A
QUENTE: ESTUDO DE CASO EM UMA USINA DE ASFALTO LOCALIZADA
NO INTERIOR DA BAHIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Sergipe – UFS, para o
encerramento do componente curricular e
conclusão da graduação em Engenharia Civil.
Orientador: Prof. Dr. Fernando Albuquerque.

SÃO CRISTÓVÃO – SE

2020

ALEX MELO

**CONTROLE TECNOLÓGICO DE CONCRETO ASFÁLTICO USINADO A
QUENTE: ESTUDO DE CASO EM UMA USINA DE ASFALTO LOCALIZADA
NO INTERIOR DA BAHIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Sergipe – UFS, para o
encerramento do componente curricular e
conclusão da graduação em Engenharia Civil.

Aprovado em: _____ de _____ de 2020

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Fernando Albuquerque
Universidade Federal de Sergipe
(Presidente – Orientador) Nota: _____

Me. Nielson Tôrres Neves de Carvalho
Engenheiro do Ministério da Economia
(1º Examinador) Nota: _____

Me. Rodrigo Fábio Silva de Oliveira
Sócio Administrador da TJM Engenharia LTDA
(2º Examinador) Nota: _____

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho primeiramente a Deus por ter me concedido os dons necessários a realização dessa empreitada. Aos meus pais, minha esposa e meus filhos pela força que me apoiaram no decorrer de minha jornada acadêmica. Aos professores e colegas que fizeram parte desse momento, á todos dedico esse projeto bem como todas as conquistas advindas dele.

RESUMO

O aumento do tráfego nas cidades gerou um aumento de exigências relacionadas a pavimentação de ruas, avenidas e estradas. Estas exigências estão diretamente relacionadas com a segurança que as rodovias garantem ao usuário, assim como o conforto e economia da circulação, e necessidade de manutenção com a maior relação custo/benefício associada às preocupações ambientais. A realização de obras de pavimentação deve seguir um eficiente planejamento técnico-econômico para adequada gestão de recursos financeiros, bem como do gerenciamento dos recursos humanos, materiais e mecânicos. O presente estudo objetivou realizar uma análise acerca do controle tecnológico de concreto asfáltico usinado a quente em uma usina de asfalto localizada no interior da Bahia. Tratou-se de um estudo de caso. As amostras foram coletadas no novo empreendimento situado no município de Ilhéus, Estado da Bahia. Para a realização do estudo foi utilizada uma mistura de CBUQ que estava sendo usinado para aplicação numa obra realizada no interior de Ilhéus. Posteriormente, esse material foi encaminhado ao laboratório da instituição a qual a presente pesquisa se destina, para que fossem realizados os ensaios dos corpos de provas, a partir dos quais foram determinados os seguintes achados: RTCD de 0,99 MPa, MR de 1968,47 MPa e uma razão MR/RTCD de 1988,35. Concluiu-se, portanto, que os ensaios realizados evidenciam um bom desempenho à fadiga da mistura asfáltica analisada, devendo ser melhor avaliada quanto ao seu desempenho na resistência às deformações permanentes.

Palavras-chave: Concreto Asfáltico, Estudo de Caso, Resistência, Desempenho.

ABSTRACT

The increase in traffic in cities has generated an increase in requirements related to paving streets, avenues and roads. These requirements are directly related to the safety that the highways guarantee to the user, as well as the comfort and economy of circulation, and need for maintenance with the highest cost/benefit ratio associated with environmental concerns. The realization of paving works must follow an efficient technical-economic planning for proper management of financial resources, as well as the management of human, material and mechanical resources. The present study aimed to perform an analysis about the technological control of hot-machined asphalt concrete in an asphalt plant located in the interior of Bahia. This was a case study. The samples were collected at the new development located in the municipality of Ilhéus, State of Bahia. For the study, a mixture of CBUQ was used that was being machined for application in a work carried out in the interior of Ilhéus. Subsequently, this material was sent to the laboratory of the institution to which the present research is intended, to perform the tests of the specimens, from which the following findings were determined: RTCD of 0.99 MPa, MR of 1968.47 MPa and an MR/RTCD ratio of 1988,35. It was concluded, therefore, that the tests performed show a good performance to fatigue of the asphalt mixture analyzed, should be better evaluated for its performance in resistance to permanent deformations.

Keywords: Asphalt Concrete, Case Study, Resistance, Performance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Distribuição de carga através da estrutura do pavimento	13
Figura 2. Estrutura de um pavimento flexível	14
Figura 3. Partes que fazem parte da composição dos pavimentos semirrígidos.	16
Figura 4. Constituição de uma mistura asfáltica	18
Figura 5. Ilhéus, estado da Bahia.....	28
Figura 6. Usina de asfalto	29
Figura 7. Granulometria da mistura de CBUQ	31
Figura 8. Esquema do ensaio de compressão diametral.....	32
Figura 9. Execução do Ensaio de RTCD	34
Figura 10. Execução do Ensaio de Módulo de Resiliência	35
Figura 11. Representação Gráfica dos tempos e deslocamentos	36
Figura 12. Resultados da RTCD (MPa).....	40
Figura 13. Resultados do ensaio de MR (MPa)	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Funções das camadas de um pavimento flexível.....	15
Tabela 2. Exemplos de composições químicas de asfaltos por tipo de cru	17
Tabela 3. Propriedades de uma mistura asfáltica.....	19
Tabela 4. Parâmetros físico-químicos dos CAP 50/70	30
Tabela 5. Dosagem da mistura de CBUQ utilizada na usina	32
Tabela 6. Módulos de resiliência e resistência de misturas investigadas no Brasil	34
Tabela 7. Propriedades da mistura de CBUQ	38
Tabela 8. Dados obtidos da análise do material coletado (CORPO DE PROVA L1) ...	39
Tabela 9. Dados obtidos da análise do material coletado (CORPO DE PROVA L2) ...	39
Tabela 10. Dados do ensaio de MR	40
Tabela 11. Comparação do MR com literatura de referência.....	42
Tabela 12. Comparação da razão MR/RTCD com literatura de referência.....	42

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A.C – Antes de Cristo

AMB – Asfaltos Modificados por Polímero

AMP – Asfalto modificado por polímero

ANP – Agência Nacional do Petróleo

CAN – Cimento asfáltico natural

CAP – Cimento asfáltico de petróleo

CM – Cura média

CR – Cura rápida

DER – Manual Pavimentos Flexíveis e Rígidos

ME – Massa específica

MR – Módulo de resiliência

NBR – Norma brasileira

RTCD – Resistência à tração por compressão diametral

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	11
2.	PAVIMENTOS	12
2.1.	CONCEITOS SOBRE PAVIMENTAÇÃO	12
2.1.	PAVIMENTO FLEXÍVEL	14
2.2.	PAVIMENTO SEMIRRÍGIDO	16
2.3.	PAVIMENTO RÍGIDO	16
2.4.	LIGANTES ASFÁLTICOS	17
2.5.	MISTURAS ASFÁLTICAS	17
2.6.	CONSTITUINTES DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	20
2.6.1.	AGREGADOS	20
2.6.2.	FÍLLER	22
2.6.3.	LIGANTE	22
2.7.	DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS	24
2.8.	DEGRADAÇÃO DE PAVIMENTOS	26
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1	LOCAL DE ESTUDO	28
3.2	CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS E LIGANTES ASFÁLTICOS	29
3.3	DOSAGEM DA MISTURA ASFÁLTICA	30
3.4	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (RTCD)	32
3.5	MÓDULO DE RESILIÊNCIA	34
4.	RESULTADOS	38
4.1.	RESISTENCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (RTCD)	39
4.2.	MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MR)	40
4.3.	RAZÃO MR/RTCD	42
5.	CONCLUSÃO	43
6.	REFERÊNCIAS	44

1. INTRODUÇÃO

Ao passo em que ocorre o aumento do volume de tráfego nas estradas e avenidas do país, ocorre também um aumento na necessidade de manutenção dessas estradas, sempre buscando a maior relação custo/benefício associada às preocupações ambientais. A realização de obras de pavimentação deve seguir um eficiente planejamento técnico-econômico para que haja adequada gestão dos recursos financeiros, bem como dos recursos humanos, materiais e mecânicos.

As misturas asfálticas são um dos principais materiais incorporados nos pavimentos das infraestruturas rodoviárias de transportes na atualidade. Para facilitar o movimento de transportes e pessoas nas rodovias, no século XIX surgiram as primeiras misturas asfálticas. No século XX, com a necessidade de construir pavimentos capazes de responder a níveis de resistência e durabilidade mais exigentes, surgiram métodos de formulação e normas regulamentadoras para assegurar a qualidade da mistura (FONSECA, 2011).

A aplicação destas misturas deve ser realizada após ensaios laboratoriais que verifiquem a percentagem de ligante que garanta uma boa durabilidade, boa resistência às ações mecânicas, boas características no desempenho funcional e estrutural e um índice de vazios adequado para evitar a exsudação do asfalto. Uma dosagem incorreta de ligante poderá gerar superfícies muito escorregadias, quando sua quantidade for em excesso, ou permitir uma desagregação prematura da mistura, quando sua quantidade for escassa (FONSECA, 2011).

O estudo do controle tecnológico do Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CBUQ) se justifica, pela necessidade crescente do uso do mesmo e da exigência no quesito qualidade e usabilidade do asfalto nas obras de médio e grande porte. Atendendo a uma exigência de qualidade e resistência, se faz necessário o controle do mesmo desde a sua fabricação na usina até os testes de eficiência.

O presente trabalho teve como objetivo avaliar uma mistura asfáltica de obra de pavimento flexível no estado da Bahia, com o intuito de verificar se a dosagem utilizada garantiu uma qualidade mínima especificada por normas brasileiras. Para isso, foram utilizados como base ensaios laboratoriais, bem como pesquisas bibliográficas que permitiram a verificação e validação dos parâmetros abordados.

2. PAVIMENTOS

Os pavimentos podem ser definidos como uma parte de uma estrada, rua, ou pista, que suporta diretamente o tráfego e transmite as respectivas solicitações à infraestrutura. De acordo com Balbo (2007), e Barreto e Silva (2015), as funções dos pavimentos são: apresentar uma superfície mais regular, onde haja melhor conforto para passagem do veículo, uma superfície mais aderente, com mais segurança para pista úmida ou molhada e uma superfície menos ruidosa, com menor desgaste ambiental nas vias urbanas e rurais.

Para Esteves (2014), pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas construída sobre terraplenagem, destinada economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego para melhorar as condições de rolamento, proporcionando condições satisfatórias de conforto e segurança.

Para Senço (2007, p.42), é um “sistema de várias camadas de espessuras finitas que se assenta sobre um semiespaço infinito que exerce a função de fundação da estrutura, chamado de subleito”.

Por fim, entende-se pavimento como uma estrutura composta por camadas sobrepostas de diferentes materiais compactados a partir do subleito, adequadas para atender estruturalmente e operacionalmente o tráfego, de forma durável e ao mínimo custo possível, considerando o serviço de manutenção e reabilitação obrigatórias (BALBO, 2007).

2.1. CONCEITOS SOBRE PAVIMENTAÇÃO

A história da pavimentação é tão antiga que há bastante divergência sobre quando e onde se inicia. Alguns estudiosos apresentam pesquisas que mostram que a pavimentação estava presente antes de Cristo (a.C), outros estudiosos apresentam histórias onde os incas foram responsáveis pela criação da pavimentação por volta do ano 1400 (ESTEVES, 2014, FONSECA,2011). Barreto e Silva (2018) cita que, de acordo com a história, é constatada que, foi na Babilônia que se construiu a primeira estrada pavimentada, dentre os anos 625 a 604 a.C.

Os estudos relacionados à melhoria dos métodos de pavimentação têm ganhado força devido a necessidade de se obter melhores eficiências e menores custos de construção e manutenção. A crescente necessidade de pavimentar estradas para facilitar a locomoção de pessoas e de cargas faz com que, conseqüentemente, aumente o consumo

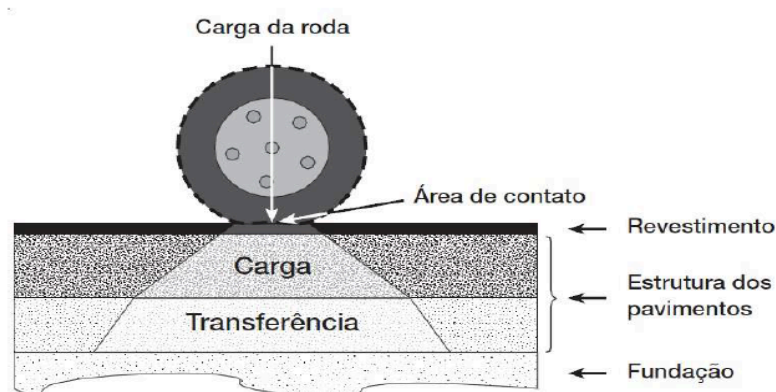
de materiais para a pavimentação. A situação atual é que depois de muitas décadas a malha asfáltica necessitada de manutenção, por isso milhares de quilômetros estão parciais ou totalmente deteriorados, havendo uma necessidade urgente de retificar os danos para que não ocorra a perda total do pavimento aplicado (SILVA,2015).

É necessário realizar estudos específicos sobre pavimento asfáltico, com finalidade de expor seus benefícios e malefícios em relação a custo e benefício. Dito isto, é fácil perceber que os órgãos públicos e particulares não dão a devida atenção aos problemas que acarretam uma pavimentação com má estrutura e de qualidade ruim, e analisam somente os gastos, cometendo negligências na aplicação da pavimentação, fazendo com que os usuários da construção sejam prejudicados (NAKAMURA, 2011).

O comportamento de um pavimento rodoviário é determinado por diferentes fatores tais como as ações decorrentes do tráfego de veículos ou resultantes dos agentes climáticos que atuam sobre ele, pela composição de seus materiais, pela característica da fundação e pelo número e espessura das camadas que o constituem (SANTOS et. al., 2006).

A distribuição da carga de uma roda pela estrutura de um pavimento pode ser verificada na Figura 1.

Figura 1. Distribuição de carga convencional para pavimento flexível



Fonte: Esteves, (2014).

As cargas que solicitam um pavimento são transmitidas por meio das rodas pneumáticas dos veículos. “A área de contato entre os pneus e o pavimento tem a forma praticamente elíptica, e a pressão exercida tem uma distribuição aproximadamente parabólica, com a pressão máxima exercida no centro da área carregada” (SENÇO, 2007,

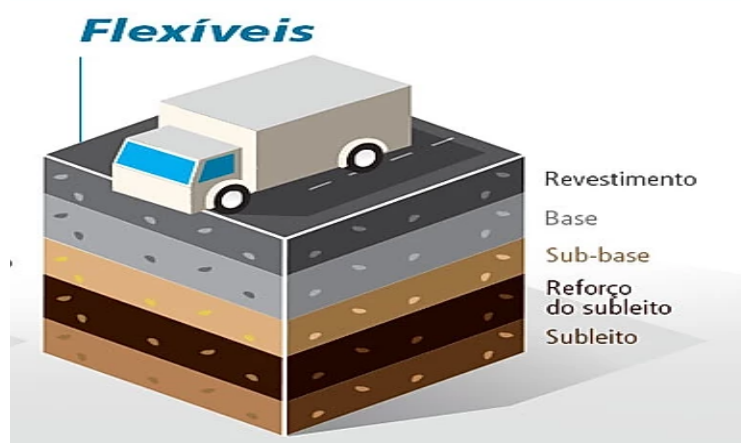
p.44). Como pode ser visto na Figura 1, a carga aplicada por uma roda na superfície é reduzida dentro da estrutura do pavimento, isto porque a carga se distribui até a fundação, dissipando as tensões geradas. Portanto, as camadas na parte superior da estrutura estão sujeitas a níveis de tensão mais elevados do que as camadas mais abaixo. Portanto, os materiais aplicados próximos ao carregamento devem ser mais nobres (ESTEVES, 2014).

O comportamento estrutural depende da espessura de cada uma das camadas, da rigidez destas e do subleito, bem como da interação entre as diferentes camadas do pavimento (BERNUCCI et al., 2008). Os revestimentos das estruturas de pavimentos são submetidos a esforços de compressão e de tração na flexão, e as camadas abaixo ao revestimento são, em geral, submetidas apenas à compressão. Os pavimentos podem ser classificados em flexíveis, semirrígidos ou rígidos.

2.1. PAVIMENTO FLEXÍVEL

Os pavimentos flexíveis são aqueles em que o revestimento é composto de uma mistura de agregados e ligantes asfálticos. É composto por camadas de revestimento, base, sub-base e, reforço de subleito (se necessário). Conforme Senço (2001), o revestimento flexível ou também chamado de não rígido é aquele que as deformidades não geram rompimento da via. Nestes revestimentos flexíveis, utiliza-se o betume, na forma de asfalto, recebendo assim o nome de revestimento asfáltico.

Figura 2. Estrutura de um pavimento flexível



Fonte: Capel, (2017).

A Figura 2 representa um pavimento flexível típico. As funções estruturais ou funcionais de cada camada desse pavimento estão ligadas à qualidade do mesmo. A qualidade estrutural do pavimento refere-se à sua capacidade de suportar as cargas dos

veículos sem sofrer alterações. A qualidade funcional, por sua vez, está relacionada às exigências do usuário, ou seja, com o conforto e segurança de rolamento (SANTOS et al., 2006). A Tabela 1 apresenta as funções das camadas constituintes de um pavimento flexível.

Tabela 1. Funções das camadas de um pavimento flexível

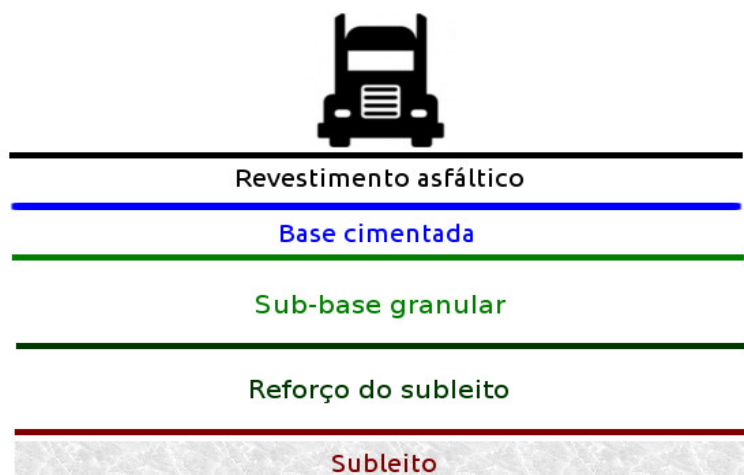
CAMADAS DO PAVIMENTO		FUNÇÃO
Camadas Superiores	Desgaste	- Adequada circulação do tráfego com conforto e segurança; - Drenagem ou impermeabilização; - Distribuições das tensões induzidas pelo tráfego.
	Regularização	- Camada estrutural; - Regularizar a camada da superfície da camada de base.
	Base asfáltica	- Camada estrutural.
Camadas granulares	Base	- Camada estrutural; - Degradações induzidas pelo tráfego.
	Sub-Base	- Proteger durante a fase construtiva as camadas inferiores; - Proteger a base da subida de água capilar; - Drenagem interna do pavimento; - Camada estrutural; - Resistência à erosão.
Solo de fundação	Leito do pavimento	- Evitar a deformação do solo - Homogeneidade das características mecânicas da fundação; - Plataforma construtiva; - Possibilidade de compactação das camadas subjacentes em adequadas condições.
	Terreno de fundação	- Suporte do pavimento; - São as suas características que condicionam o dimensionamento.

Fonte: Santos, (2016).

2.2. PAVIMENTO SEMIRRÍGIDO

De acordo com o Manual Pavimentos Flexíveis e Rígidos do DER-Paraná, (2008), pavimentos semirrígidos possuem como principal característica uma base ou sub-base estabilizada quimicamente, revestido por camada asfáltica.

Figura 3. Camadas que fazem parte da composição dos pavimentos semirrígidos



Fonte: DER-PR, (2008).

Sendo assim, como pode ser visto nos pavimentos flexíveis, os semirrígidos também recebem revestimentos de materiais asfálticos. A diferença entre eles se dá devido ao fato de existir a presença de ligantes hidráulicos (cimento Portland ou cal hidratada) em sua base ou sub-base. Isso ocorre porque se deseja alcançar uma camada de grande rigidez para que haja resistência as cargas advindas do tráfego de projeto (SANTOS, 2016).

2.3. PAVIMENTO RÍGIDO

Segundo Senço (2001), nos pavimentos rígidos o revestimento é de concreto de cimento Portland, onde sua espessura é obtida em função da resistência das placas de concreto e da resistência de sua camada inferior, recebendo, em geral, o nome de sub-base, ambas acima do subleito.

As placas de concreto nesse pavimento podem ser armadas ou não com vergalhões de aço (mais comum não armados), possuindo o concreto a resistência suficiente para suportar os esforços como revestimento e base (SENÇO, 1997). A distinção da tipologia

desse pavimento é baseada na estrutura do mesmo, visto que cada tipo de pavimento possui uma constituição diferente, com camadas de diferentes espessuras e composições.

É importante levar em consideração que os termos rígido e flexível referem-se à estrutura do pavimento como um todo, em especial a diferença que existe na forma de transmissão de tensões para o subleito (ESTEVES, 2014). Para o caso de pavimentos rígidos, as tensões são bem distribuídas abaixo da área da placa, enquanto os flexíveis são bem concentrados abaixo da carga de roda.

2.4. LIGANTES ASFÁLTICOS

O asfalto é um dos mais antigos e versáteis materiais de construção utilizados pelo homem. O Manual de asfalto lista mais de 100 das principais aplicações desse material, desde a agricultura até a indústria (BARRETO; SILVA, 2015). O uso em pavimentação é um dos mais importantes entre todos e um dos mais antigos também. Na maioria dos países do mundo, a pavimentação asfáltica é a principal forma de revestimento.

A tabela 2 traz uma abordagem acerca das composições químicas que podem ser encontradas nos asfaltos:

Tabela 2. Exemplos de composições químicas de asfaltos por tipo de cru

Origem	Mexicano	Boscan Venezuela	Califórnia Estados Unidos	Cabiúnas Brasil	Cabiúnas Brasil	Árabe Leve Oriente Médio
Refinaria	–	RLAM Bahia	–	Regap Minas Gerais	Replan São Paulo	Reduc Rio de Janeiro
Carbono %	83,8	82,9	86,8	86,5	85,4	83,9
Hidrogênio %	9,9	10,4	10,9	11,5	10,9	9,8
Nitrogênio %	0,3	0,8	1,1	0,9	0,9	0,5
Enxofre %	5,2	5,4	1,0	0,9	2,1	4,4
Oxigênio %	0,8	0,3	0,2	0,2	0,7	1,4
Vanádio ppm	180	1.380	4	38	210	78
Níquel ppm	22	109	6	32	66	24

Fonte: Leite, (2003).

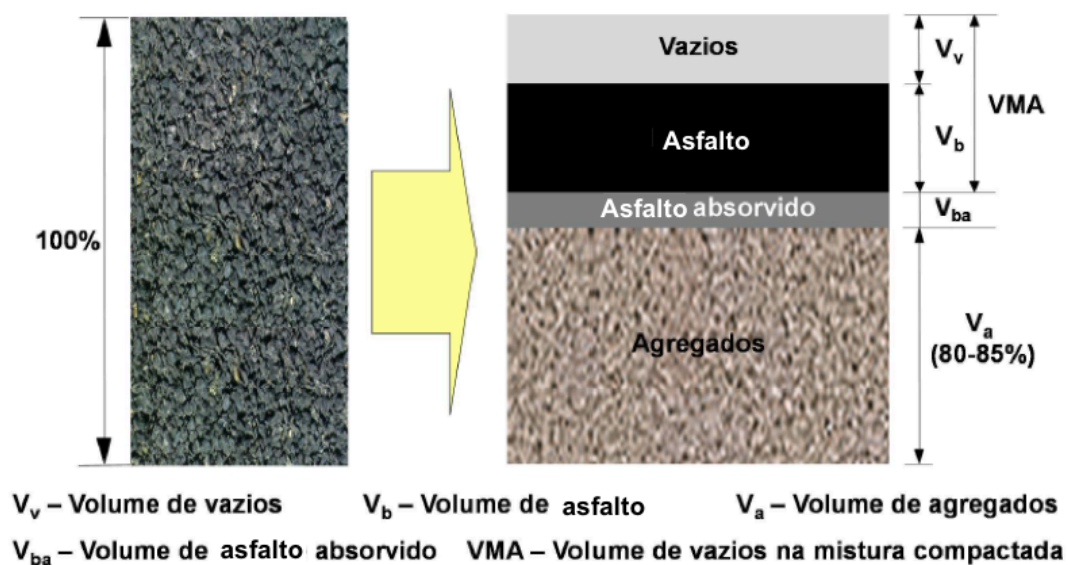
2.5. MISTURAS ASFÁLTICAS

Segundo Pimentel (2013), as misturas asfálticas são compostas por uma mistura de ligante e de agregados, de forma que todas as partículas dos agregados sejam revestidas por uma película de ligante. O processo de fabricação dessa mistura implica o

aquecimento destes componentes, e a sua mistura e aplicação em obra também deve ser feita em temperaturas superiores à temperatura ambiente.

As misturas asfálticas são compostas por agregados (80 a 85%), asfalto (em torno de 5 %) e ar, cujas propriedades derivam das proporções relativas dos outros componentes. A aplicação destas misturas é normalmente feita em pavimentos rodoviários ou aeroportuários e deve sempre ser precedida por ensaios que determinem a percentagem de ligante que deve ser utilizado na mistura, para que esta esteja dentro das especificações definidas por norma. Isto garante que não ocorra degradação prematura da mistura por falta de ligante ou que as superfícies sejam escorregadias e deformáveis por excesso de ligante (PIMENTEL, 2013). A Figura 4 ilustra a constituição de uma mistura asfáltica.

Figura 4. Constituição de uma mistura asfáltica



Fonte: Pimentel, (2013).

Fonseca (2011), afirma que as misturas asfálticas devem possuir algumas propriedades para garantir a qualidade do pavimento, dentre elas encontram-se a flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à fadiga, resistência à derrapagem, impermeabilidade e trabalhabilidade, as quais estão dispostas, sintetizadas e correlacionadas na Tabela 3.

Tabela 3. Propriedades de uma mistura asfáltica

Propriedades	Definição	Variáveis que afetam as propriedades
Flexibilidade	Capacidade de se deformar, de modo a permitir a adaptação das camadas asfálticas.	Granulometria; percentagem de asfalto; rigidez do asfalto.
Estabilidade	Consiste em obter uma mistura com a capacidade adequada para resistir às deformações plásticas produzidas pelas cargas. Depende essencialmente da fricção interna dos materiais e da sua coesão.	Granulometria; percentagem de asfalto; rigidez do asfalto; grau de compactação.
Durabilidade	Resistência à degradação causada pelo tráfego e pelos efeitos dos agentes atmosféricos.	Granulometria; percentagem de asfalto; grau de compactação; temperatura da mistura.
Resistência à fadiga	Aptidão da mistura em resistir os esforços de flexão repetidos sem trincar.	Granulometria; percentagem de asfalto; grau de compactação; temperatura da mistura.
Resistência à derrapagem	Capacidade da superfície de um pavimento, quanto molhada, em oferecer resistência ao deslizamento e à derrapagem.	Granulometria; tipo e textura do agregado; resistência do agregado ao polimento.
Impermeabilidade	Aptidão da mistura em impedir o acesso de água às camadas inferiores.	Granulometria; percentagem de asfalto; grau de compactação.
Trabalhabilidade	Facilidade de uma mistura asfáltica em ser espalhada e compactada.	Granulometria; percentagem e tipo de asfalto; tipo de agregado.

Fonte: Fonseca, (2011).

2.6. CONSTITUINTES DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

As misturas asfálticas são compostas por agregados e o asfalto, sendo que também podem ser utilizados aditivos que melhoram as características da mistura asfáltica, tais como fibras, borracha ou polímeros. A seguir, serão apresentados os principais componentes das misturas asfálticas.

2.6.1. Agregados

Os agregados compõem uma parcela significativa do concreto tradicional, cerca de 75% e, em misturas asfálticas, representam aproximadamente 93 a 97% em massa. Portanto, a escolha do agregado correto impacta significativamente no desempenho da mistura (OLIVEIRA et al, 2014). Em geral, os agregados são formados por partículas duras e resistentes, isentas de produtos insalubres, tais como: argila, mica, silte, sais minerais, matéria orgânica, entre outros (ANDOLFATO, 2002).

Para que um pavimento asfáltico seja de qualidade, é importante que exista uma boa conexão entre seus componentes, ligantes asfálticos, agregados, entre outros. É essencial que exista um controle de qualidade do agregado a ser utilizado na produção de uma mistura asfáltica, e, além disso, este deve apresentar propriedades específicas que suportem tensões internas e externas. Desta forma, é essencial utilizar ensaios laboratoriais especificados por norma para garantir a qualidade do agregado (OLIVEIRA et. al. 2014).

Para Oliveira et al (2014), os agregados podem ser classificados de diversas maneiras, sendo estas quanto à origem, à dimensão das partículas, à massa unitária e à composição das partículas:

- a) Quanto à origem, os agregados podem ser classificados como:
 - Naturais: quando já são encontrados na natureza sob forma definitiva de utilização. Podem ser citados a areia de rios, seixos, cascalhos e pedregulhos;
 - Artificiais: quando são obtidos através do britamento de rochas, tal como o pedrisco e a pedra britada;
 - Industrializados: são aqueles obtidos através de processos industriais, podendo citar a argila expandida e escória britada.
- b) dimensão das partículas (NBR 7211:2005 – Agregados para concreto):

- Agregados miúdos: areia de origem natural ou resultando do britamento de rochas estáveis, ou a mistura de ambas, cujos grãos passem pela peneira com abertura nominal de 4,75 mm e fiquem retidos na peneira com abertura de malha de 150 μ m. As areias também podem ser classificadas conforme o valor do seu módulo de finura, o qual é calculado a partir da soma das porcentagens retidas acumuladas nas peneiras da série normal:

- I) Areia grossa – módulo de finura entre 3,35 e 4,05;
- II) Areia média – módulo de finura entre 2,40 e 3,35;
- III) Areia fina – módulo de finura entre 1,97 e 2,40;
- IV) Areia muito fina – módulo de finura menor que 1,97.

- Agregados graúdos: pedregulho natural, ou a pedra britada proveniente do britamento de rochas estáveis, ou mistura de ambos, quando os grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm. Estes agregados também podem ser classificados conforme o tamanho das suas partículas componentes (diâmetros máximos e mínimos):

- I) Brita 0 – 4,8 a 9,5 mm;
- II) Brita 1 – 9,5 a 19 mm;
- III) Brita 2 – 19 a 25 mm;
- IV) Brita 3 – 25 a 50 mm;
- V) Brita 4 – 50 a 76 mm;
- VI) Brita 5 – 76 a 100 mm.

- c) Quanto à massa específica (ME), os agregados podem ser classificados em:

- Leves: $ME < 1000 \text{ kg/m}^3$;
- Médios: $1000 \text{ kg/m}^3 \leq ME \leq 2000 \text{ kg/m}^3$;
- Pesados: $ME > 2000 \text{ kg/m}^3$.

- d) Quanto a sua composição mineralógica, os agregados podem ser classificados como:

- Sedimentares: compostos por calcário ou arenito;
- Ígneos: compostos por basalto ou granito;
- Metamórficos: compostos por ardósia, mármore ou gnaisse.

2.6.2. Filler

O filler é a designação utilizada para referir-se a todo agregado cuja maior parte (entre 70% a 100%) passa na malha da peneira de 0,075 mm e que pode ser utilizado na composição de materiais de construção para garantir-lhes algumas propriedades específicas (ESTEVES, 2014).

As características químicas e físicas do filler influenciam as características da mistura asfáltica, e garante à mesma algumas capacidades que contribuem para a sua compactação e melhora a impermeabilidade da mistura. O filler utilizado pode ser natural ou artificial, de origem inorgânica ou mineral. Na prática, classifica-se o filler por recuperado, o qual corresponde a pequenas partículas de pó que são recuperadas por aspiração nas centrais de betuminosos durante a secagem do agregado, ou então filler comercial, o qual é produzido de forma autônoma para comercialização (SILVA, 2014).

2.6.3. Ligante

O ligante é o material que possui características que garantem a ligação entre os agregados e a coesão da mistura, por isso, é um componente essencial da mistura asfáltica (SILVA, 2014). Para Bernucci et al (2008), entre os motivos da intensiva utilização dos asfaltos em pavimentos, destaca-se que ele proporciona uma forte união dos agregados, aumentando os parâmetros de resistência e durabilidade. Pode-se destacar também que é um material impermeabilizante e resistente à maioria dos agentes externos como os ácidos, álcalis e sais. O asfalto é resultado da destilação do petróleo, composto em nível intermolecular de hidrocarbonetos saturados e aromáticos.

No nível molecular, a grande variedade de moléculas presentes torna impossível a determinação exata de sua composição (CERATTI, 2010). É um material visco elástico, adesivo, impermeável e pouco reativo. Apesar da baixa reatividade, o asfalto sofre um processo de oxidação lenta quando em contato com ar e água. Temperaturas elevadas (superiores a 150°C) combinadas com finas espessuras de asfalto, a oxidação e a perda de materiais voláteis do material ocorrem rapidamente. Por essa razão, os asfaltos devem ser estocados a baixas temperaturas, mas suficientes para proporcionar a fluidez necessária para o uso proposto (BERNUCCI et al, 2008). Os cimentos asfálticos podem ser obtidos de forma natural, sendo denominado cimento asfáltico natural (CAN), ou pela destilação do petróleo, recebendo o nome de cimento asfáltico do petróleo (CAP). No Brasil, o tipo mais utilizado é o CAP.

A Norma EM 095 (DNIT, 2006) define o CAP como “[...] o asfalto obtido especialmente para apresentar as qualidades e consistências próprias para o uso direto na construção de pavimentos”. Atualmente, o CAP é classificado em termos de sua penetração a 25°C, conforme ensaio prescrito na norma NBR 6576:1998. Quanto maior for a penetração da agulha, menor a consistência do material. Para a classificação, o resultado obtido no ensaio é enquadrado nas seguintes faixas estabelecidas pela norma: 30/45, 50/70, 85/100 e 150/200.

Em aplicações em condições especiais, como regiões com condições climáticas extremas, pistas de aeroportos ou rodovias com elevado volume de tráfego, tem-se mostrado cada vez mais necessário a melhora das propriedades dos ligantes, tornando-os mais resistentes e duráveis que o CAP convencional. A modificação do ligante é feita principalmente através da incorporação de polímeros à mistura, dando origem ao asfalto modificado por polímero (AMP). O tipo e a quantidade de polímero incorporada ao ligante dependem da finalidade desejada. Trata-se de um ligante que melhora as características adesivas e coesivas da mistura, além de propiciar um material mais leve e de fácil manuseio.

O revestimento composto por AMP costuma apresentar maior ponto de amolecimento, imprimindo maior resistência à deformação permanente e trincas de fadiga e térmicas, aumentando a durabilidade do revestimento. Por se tratar de um revestimento composto de difícil degradação, não aceita satisfatoriamente o processo de reciclagem, sem antes ser reprocessado.

Na maioria dos países, inclusive no Brasil, a especificação do tipo de asfalto a ser utilizado em uma determinada obra de pavimentação é baseada principalmente pelas características físicas dos ligantes, obtidas através de ensaios laboratoriais.

Os principais parâmetros utilizados são a dureza, medida pela penetração, e a resistência ao fluxo, obtida através do ensaio de viscosidade. Essas propriedades dependem da temperatura na qual o ligante asfáltico se encontra, uma vez que ele se apresenta em estado semissólido a baixas temperaturas, viscoelástico a temperatura ambiente e líquido a altas temperaturas (BERNUCCI et al, 2008).

A característica de termoviscoelasticidade desse material manifesta-se no comportamento mecânico, sendo suscetível à velocidade, ao tempo e à intensidade de carregamento, e à temperatura de serviço. O comportamento termoviscoelástico é mais

comumente assumido do que o termoviscoplastico, com suficiente aproximação do real comportamento do material. O CAP é um material quase totalmente solúvel em benzeno, tricloroetileno ou em bissulfeto de carbono, propriedade que será utilizada como um dos requisitos de especificação (OLIVEIRA; ANDRADE; LAPERCHE, 2014).

O CAP deve ser sempre estocado e manuseado à temperatura mais baixa possível em relação à fluidez ao uso, considerando a viscosidade adequada para a operacionalidade das ações necessárias aos processos de mistura em linha ou transferência para os sistemas de transportes (HUNTER, 2000; SHELL, 2003). Os tipos de ligantes asfálticos existentes no mercado brasileiro são denominados:

- Cimentos Asfálticos de Petróleo – CAP;
- Asfaltos Diluídos – ADP;
- Emulsões Asfálticas – EAP;
- Asfaltos Oxidados ou soprados de uso industrial;
- Asfaltos Modificados por Polímero – AMP ou por borracha de pneus – AMB;
- Agentes Rejuvenescedores – AR e ARE.

Atualmente, há ainda a técnica de asfalto-espuma sendo empregada no Brasil, mas que rigorosamente não constitui uma outra classe de material pelo tipo de aplicação de curta duração que sofre o CAP convencional nesta condição.

2.7. DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS

A dosagem de misturas asfálticas visa o estabelecimento de uma composição que cumpra certas exigências, através de um conjunto de procedimentos e ensaios para determinar as proporções dos constituintes das misturas. As exigências impostas dependem de vários fatores, como o tipo de estrada e o tipo de camada de pavimento. Por essa razão é imprescindível o estudo continuado de métodos de dosagem, de modo a conseguir oferecer uma resposta adequada aos problemas que surgem ao longo dos anos. Estes métodos podem se classificar nas seguintes categorias: por especificação, empíricos, analíticos, volumétricos e racionais (SILVA, 2014).

Os métodos por especificação são utilizados para misturas asfálticas tradicionais, portanto, para àquelas que não fazem uso de qualquer material não definido na

especificação. Neste método são definidas a curva granulométrica dos agregados, a classe de penetração do betume a usar e a composição final da mistura asfáltica. Define-se a espessura da camada a colocar e as características que a mistura deve ter durante o espalhamento e compactação. Não é feito qualquer tipo de ensaio laboratorial (CAPITÃO, 2003).

Os métodos empíricos, por sua vez, abrangem alguns ensaios laboratoriais mecânicos simples e econômicos. Pretende-se determinar a quantidade de betume a usar e deste modo controlar variáveis como a porosidade e estabilidade da mistura cumprindo, no entanto, com os limites estabelecidos por experiência antecedente. Este método não permite determinar as propriedades intrínsecas das misturas, apenas grandezas mecânicas, as quais não se relacionam de forma direta com o desempenho em obra (SANTOS, 2016).

Já os métodos de dosagem analíticos consistem no cálculo da composição volumétrica de misturas asfálticas, nomeadamente a proporção de cada uma das frações de agregados usados e os volumes de betume e de vazios. Estes métodos não incluem moldagem de corpos de prova, pelo que a composição a que se chega é de origem completamente analítica. Os métodos analíticos não têm por objetivo a obtenção de uma percentagem ótima de betume, antes visam determinar uma composição que assegure a melhor relação entre a resistência ao trincamento por fadiga (que é melhor para maiores teores de CAP na mistura) e a resistência à deformação permanente (que é pior para maiores teores de CAP na mistura), o que não corresponde necessariamente à dosagem de uma mistura asfáltica com um desempenho adequado em obra (CAPITÃO, 2003).

Os métodos volumétricos são assim designados porque a percentagem de betume e granulometria a ser utilizada é obtida através da análise dos volumes das parcelas que compõe as misturas (vazios, betume e agregados). Aqueles volumes são medidos através de corpos de prova produzidos em laboratório de modo a reproduzirem, tão fielmente quanto possível, as condições de compactação usadas in situ. Nestes métodos, a seleção da curva granulométrica e da percentagem ótima de betume a usar é feita pela verificação da maior ou menor correspondência entre formulações testadas e certos requisitos da compatibilidade pré-definidos, entendendo-se estes como uma medida da aptidão da mistura a ser compactada (CAPITÃO, 2003). Observam-se, sobretudo, intervalos válidos de relação betume-vazios, índice de vazios da mistura etc.

Os métodos racionais empregam, por exemplo, métodos volumétricos para a fabricação de corpos de prova submetendo-os posteriormente a ensaios relacionados com o comportamento em serviço da mistura. Analisam-se certas características, tais como: a rigidez, a deformação permanente e a resistência à fadiga. Os ensaios são demorados e dispendiosos, por isso esta categoria de métodos é apenas usada quando se trata de redes viárias mais importantes (SILVA, 2014).

2.8. DEGRADAÇÃO DE PAVIMENTOS

Esteves (2014), destaca os principais mecanismos de degradação de pavimentos betuminosos:

I) Trincamento das camadas asfálticas

Este tipo de degradação pode ocorrer devido ao trincamento por fadiga, com início na base das camadas, processo que resulta da repetida aplicação de esforços de tração induzidos na base das camadas asfálticas pela passagem das rodas dos veículos pesados.

Pode acontecer também pelo processo de reflexão de trincas, o qual resulta da propagação de trincas existentes em camadas subjacentes à camada superior, que por sua natureza ou por estarem danificadas possuindo trincas ou juntas de retração.

Além disso, pode ocorrer o trincamento com origem na superfície (top down), o qual é normalmente evidenciado em pavimentos com estruturas mais espessas. Este processo pode ocorrer devido a diversos fenômenos, como o envelhecimento das misturas asfálticas das camadas de desgaste, ou os estados de tensão induzidos na zona de contato entre o pneu ou nas suas proximidades, eventualmente combinados com ações térmicas.

II) Deformações permanentes na superfície

Este tipo de degradação pode ocorrer devido às deformações com origem nas camadas de materiais granulares e de solos. Ou seja, resultam do somatório das deformações plásticas nas camadas que integram o pavimento e sua fundação, sob a ação repetida da passagem dos veículos pesados. Estas deformações podem-se traduzir por depressões longitudinais nas zonas de passagem das rodas ou por ondulações no pavimento no sentido longitudinal que se enquadram na designação genérica de irregularidade superficial.

Pode ocorrer também deformações com origem nas camadas de misturas asfálticas. Neste caso, as deformações ocorrem em função das deformações visco-plásticas das camadas de misturas asfálticas sob a ação da repetida passagem dos veículos pesados, em particular quando estes circulam em baixa velocidade ou em condições de temperatura ambiente elevada. O pavimento, nesta situação, experimenta um adensamento e depois uma deformação cisalhante.

III) Degradações da superfície

A desagregação consiste no desprendimento de partículas de agregado e na perda de ligante betuminoso da camada de desgaste. As principais causas para o aparecimento de desagregação superficial estão geralmente relacionadas com a composição da mistura, que poderá ter uma quantidade de ligante insuficiente para envolver convenientemente os agregados, ou com a falta de adesividade entre o betume e os agregados, seja devido à natureza dos mesmos, ou à alteração das propriedades do betume sob a ação dos agentes atmosféricos.

Pode ocorrer também a exsudação do betume, a qual consiste na migração do ligante presente na mistura asfáltica para a superfície do pavimento, ocorrendo geralmente na zona de passagem das rodas dos veículos. As principais causas para a ocorrência deste tipo de degradação estão relacionadas com a composição da mistura asfáltica, que pode ter uma proporção excessiva de betume e/ou índice de vazios reduzido. Sob a ação da passagem das rodas do veículo, especialmente em altas temperaturas, a compressão da camada asfáltica pode, neste caso, originar a expulsão do asfalto para a superfície.

Também pode acontecer o polimento dos agregados, fenômeno que consiste na perda de microtextura superficial dos agregados, por desgaste, que provoca a redução do coeficiente de atrito entre os pneus e o pavimento, com evidentes consequências na segurança da circulação dos veículos.

Existe também a ocorrência de desprendimento de blocos da camada de desgaste, que pode ser provocada por uma deficiência localizada da mistura asfáltica da camada de desgaste ou por uma deficiência na ligação entre esta camada e a camada subjacente.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho consiste no estudo de caso em uma usina de misturas asfálticas. Neste estudo foram realizados ensaios para a determinação de algumas propriedades de resistência em um lote de produção desta usina, envolvendo toda a caracterização física dos materiais empregados e da mistura asfáltica resultante. A avaliação da mistura foi realizada a partir dos resultados de resistência à tração e módulo de resiliência, de forma que se pudesse enquadrar a mistura asfáltica produzida em padrões de qualidade normativos ou baseado na bibliografia especializada.

3.1 LOCAL DE ESTUDO

As amostras foram coletadas em um novo empreendimento no município de Ilhéus, Estado da Bahia, cuja área pavimentada tem aproximadamente 51.000 m². O local da coleta tem as coordenadas topográficas 10°51'18''S e 37°07'33''O. A Figura 5 apresenta um mapa contemplando a área de estudo.

Figura 5. Ilhéus, estado da Bahia



Fonte: Wikipédia, (2020).

As imagens (Figura 6) mostram a área reservada para a usina onde foram realizadas coletas para posterior análise. Com o intuito de acelerar o processo de pavimentação do empreendimento, foi solicitada aos órgãos responsáveis a instalação da usina dentro do canteiro de obras a fim de acelerar o processo de fabricação e reduzir o tempo de transporte, mantendo a temperatura adequada para aplicação da mistura asfáltica.

Figura 6. Usina de asfalto



Fonte: Dados do pesquisador, (2020).

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS E LIGANTES ASFÁLTICOS

Quanto a procedência dos insumos, destaca-se que o ligante utilizado para a produção da mistura asfáltica estudada foi o CAP 50/70, que é o mais utilizado na região e é fornecido pela Refinaria Landulpho Alves, em São Francisco do Conde/Bahia, mesma fornecedora do DOPE (melhorador de adesividade). De acordo com os dados apresentadas na Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico – FISPQ, o CAP 50/70 utilizado na mistura aqui estudada possui as seguintes características:

Estado físico: Semissólido.

Cor: Marrom escuro.

Odor: Característico.

pH: Não aplicável.

Solubilidade:

- *Na água:* Insolúvel.

- *Em solventes orgânicos:* Tricloroetileno (99%).

Além disso, o certificado de ensaio para o cimento asfáltico (CAP 50/70) emitido pelo laboratório RLAM, válido para o CAP utilizado na mistura estudada neste trabalho, traz algumas informações a respeito de suas características físico-químicas, conforme Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros físico-químicos dos CAP 50/70

Característica	Método	Especificação	Resultado	Unidade
PENETRACAO	D 5	50 a 70	51	0,1 mm
PONTO DE AMOLECIMENTO	D 36	46 min.	54	grau C
VISCOSIDADE BROOKFIELD 135GC-SP21 20RPM	D 4402	274 min.	414	cp
VISCOSIDADE BROOKFIELD 150 GC-SP21	D 4402	112 min.	213	cp
VISCOSIDADE BROOKFIELD A 177GC SP21	D 4402	57 a 285	84	cp
RTFOT PENETRACAO RETIDA	D 5	55 min.	69	%
RTFOT-AUMENTO DO PONTO DE AMOLECIMENTO	D 36	8 max.	4	grau C
RTFOT - DUCTILIDADE A 25GC	D 113	20 min.	32	cm
RTFOT VARIACAO EM % MASSA	D 2872	-0.50 a 0.50	0,01	%
DUCTILIDADE A 25 GC	D 113	60 min.	103	cm
SOLUBILIDADE NO TRICLOROETILENO	D 2042	99.5 min.	100,0	% massa
PONTO DE FULGOR	D 92	235 min.	364	grau C
INDICE DE SUSCETIBILIDADE TERMICA	X 018	-1.5 a 0.7	-0,2	
DENSIDADE RELATIVA A 20/4 GRAUS CELSIUS	D 70	Anotar (1)	0,996	
AQUECIMENTO A 177 GC	X 215	NESP (2)	NESP	

Notas:
 (1) Ensaio nao faz parte da especificacao. Informacao para fins de faturamento.
 (2) NESP = Nao espuma

Fonte: Certificado de ensaio RLAM, (2019).

O material pétreo, a brita e o pó de pedra, foram extraídos de uma pedreira localizada no município de Ilhéus, a qual têm rochas predominantemente do tipo Gnaisse. Quanto a areia utilizada no traço, foi proveniente de rio e isenta de matéria orgânica.

O material coletado foi encaminhado para um laboratório de controle no mesmo canteiro de obra onde foram moldados os corpos de prova (L1, L2 – destinados ao ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral; L3, L4, e L5 – destinados ao ensaio de Módulo de Resiliência). Logo, todos os itens foram embalados, identificados por números e remetidos ao Laboratório de Topografia e Transportes (LTT), anexo ao Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Universidade Federal de Sergipe (UFS) para elaboração dos ensaios.

3.3 DOSAGEM DA MISTURA ASFÁLTICA

Segundo Oliveira et al (2014), a chamada dosagem Marshall é o método mais utilizado para projetos de misturas asfálticas na pavimentação no Brasil. Esta foi criada na década de 30 por Bruce Marshall, e o método se baseava na estabilidade e na fluência

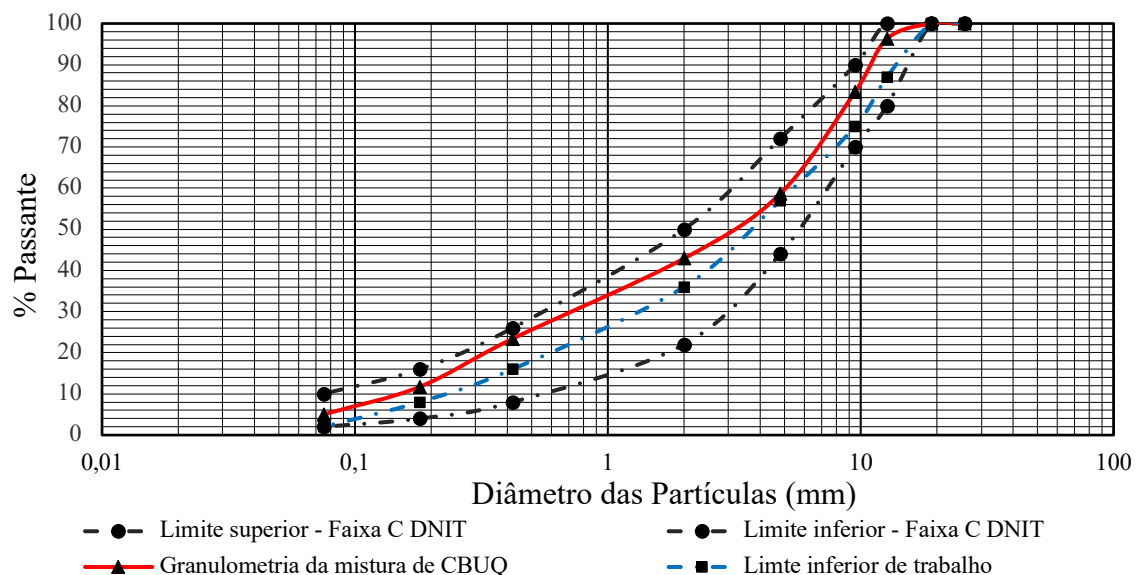
da mistura asfáltica, analisadas empiricamente, mas que, com sua evolução, a densidade, relação betume-vazios e volume de vazios passaram a ser os itens mais importantes a se observar. Complementarmente, ensaios mecânicos, como resistência à tração (obrigatório) e módulo de resiliência (desejável), são aplicados para um projeto de mistura mais amplo.

Para a utilização deste método devem ser definidos os seguintes elementos básicos de projeto:

- Tipo e destino da mistura;
- Granulometria, massa específica e real dos agregados;
- Escolha da faixa granulométrica de projeto;
- Escolha da energia de compactação em função do tráfego previsto.

É considerado um método simples, de rápida execução e baixo custo de equipamentos. No Brasil, o ensaio Marshall é regulamentado pela norma ME 043/95 (DNER, 1995). A curva granulométrica da mistura está inserida na Faixa C do DNIT (Figura 7), e a dosagem resultante é apresentada na Tabela 5.

Figura 7. Granulometria da mistura de CBUQ



Fonte: Dados do pesquisador, (2020).

A Figura 7 apresenta os limites superior e inferior da faixa granulométrica “C”, o limite inferior de trabalho, e a curva granulométrica da mistura de CBUQ Faixa C.

Tabela 5. Dosagem da mistura de CBUQ utilizada na usina

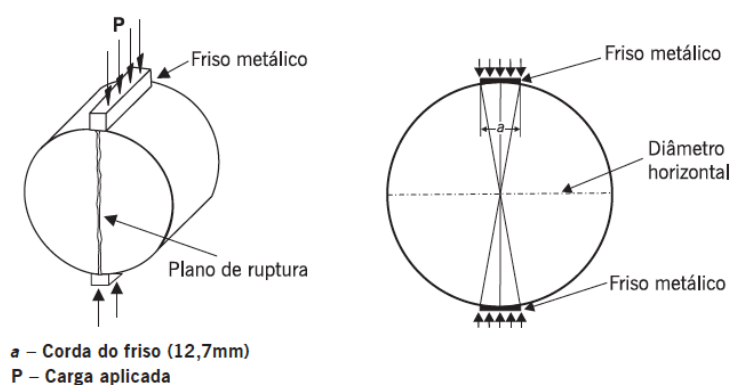
Material	Teor em massa (%)
Brita 5/8"	37,88
Pó de pedra	43,35
Areia fina	9,47
CAP 50/70	5,30
DOP	1 L/15000 L de CAP

Fonte: Dados do pesquisador, (2020).

3.4 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (RTCD)

O ensaio de compressão diametral foi desenvolvido no Rio de Janeiro pelo professor Lobo Carneiro e é adotado para a caracterização de misturas asfálticas desde 1972. Este ensaio consiste na aplicação de duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão em um cilindro, de forma que estas gerem ao longo do diâmetro solicitado, tensões de tração uniformes perpendiculares a esse diâmetro (BERNUCCI et al, 2008). O esquema deste ensaio é ilustrado na Figura 8.

Figura 8. Esquema do ensaio de compressão diametral



Fonte: Bernucci et al, (2008).

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RTCD) de misturas asfálticas é regido pela norma DNIT – ME 136/2010. Este ensaio consiste em romper as amostras com auxílio de uma prensa hidráulica, sob uma temperatura de $25 \pm 0,5$ °C. A resistência deve ser calculada segundo a Equação 1:

$$\sigma_R = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot H} \quad (1)$$

Na qual:

σ_R – Resistência à tração (MPa);

P – Carga de ruptura (N);

D – Diâmetro do corpo de prova (mm);

H – Altura do corpo de prova (mm).

Segundo Bernucci et al (2008), o corpo de prova a ser utilizado neste ensaio deve ter uma altura entre 35 mm a 70 mm e diâmetro de 100 ± 2 mm, e o procedimento a ser realizado é o seguinte:

- Medir a altura (H) do corpo de prova com um paquímetro, em quatro posições paralelas (adotar como altura a média aritmética das quatro leituras);
- Medir o diâmetro (D) do corpo de prova com um paquímetro, em três posições paralelas (adotar como diâmetro a média aritmética das três medidas);
- Manter o corpo de prova apoiado sobre uma geratriz em compartimento com temperatura controlada de 25 °C, por no mínimo 4 horas. Alternativamente podem ser consideradas outras temperaturas, dependendo dos requisitos de projeto;
- Posicionar o corpo de prova no dispositivo centralizados e levar à prensa;
- Juntar os pratos da prensa até que seja obtida uma leve compressão;
- Aplicar a carga progressivamente, com uma velocidade de deslocamento de $0,8 \pm 0,1$ mm/s até que se dê a ruptura, por separação das duas metades do corpo de prova, segundo o plano diametral vertical;
- Com o valor de carga de ruptura (F) obtido, calcular a resistência à tração através da Equação 1.

O valor obtido para a resistência à tração deve ser no mínimo de 0,65 MPa para misturas asfálticas a quente recém moldadas. Logo após a construção em pista os valores típicos variam entre 0,5 MPa e 2,0 MPa. Para o presente trabalho foram moldados dois corpos de prova para a realização de ensaio de resistência à tração por compressão diametral (Figura 9). Seus resultados foram avaliados estatisticamente e comparados à referência normativa e registros da Tabela 6.

Figura 9. Execução do Ensaio de RTCD



Fonte: Dados do pesquisador, (2020).

Tabela 6. Módulos de resiliência e resistência de misturas investigadas no Brasil

Características	Faixa (publicação)	MR (MPa)	RT (MPa)	MR/RT
Concreto asfáltico – CAP 30/45	Faixa C (Soares <i>et al.</i> , 2000)	3.628	1,09	3.346
Concreto asfáltico – CAP 50/60		3.033	0,89	3.425
Concreto asfáltico – CAP 85/100		1.488	0,44	3.376
Concreto asfáltico – CAP 30/45	Faixa B (Soares <i>et al.</i> , 2000)	5.105	0,82	6.201
Concreto asfáltico – CAP 50/60		4.425	0,73	6.062
Concreto asfáltico – CAP 85/100		1.654	0,21	7.755
Misturas densas (moldadas em usina)	Faixa C (Rede Asfalto, 2005)			
Concreto asfáltico 1		2.651	0,85	3.119
Concreto asfáltico 2		2.297	0,67	3.428
AAUQ1		1.825	0,52	3.510
AAUQ2		1.683	0,72	2.338
Misturas densas (moldadas em laboratório)	Faixa C (Rede Asfalto, 2005)			
Concreto asfáltico 1		3.609	1,26	2.864
Concreto asfáltico 2		3.026	1,23	2.460
AAUQ1		1.786	1,02	1.751
AAUQ2		1.682	0,81	2.077
SMA – 12,5mm	(Vasconcelos, 2004)	4.747	0,98	4.844
SMA – 9,5mm		3.367	0,82	4.106
Concreto asfáltico de referência	Faixa C (Lima, 2003)			
Com 0% fresado		3.200	1,20	2.667
Com 10% fresado		4.776	1,30	3.674
Com 30% fresado		7.524	1,30	5.787
Com 50% fresado		8.901	1,60	5.663
Concreto asfáltico de referência	Faixa C (Pinheiro, 2004)	3.647	0,97	3.760
Asfalto-borracha (úmido)		2.393	0,50	4.786
Agregado-borracha (seco)		2.452	0,80	3.065

Fonte: Bernucci et al, (2008).

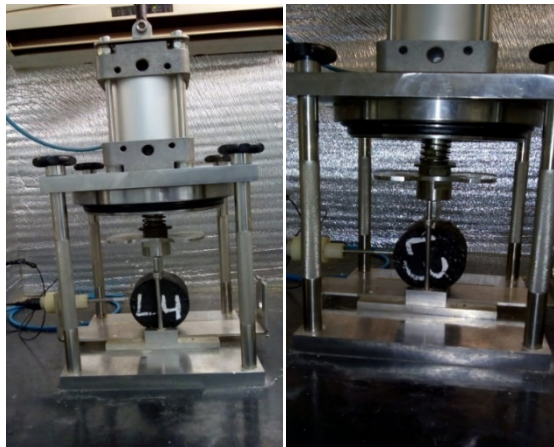
3.5 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

O termo resiliência, segundo Dias (p. 73, 2004), significa “energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações, correspondente à energia potencial de deformação”. O módulo de resiliência é determinado a partir da deformação elástica medida, a qual é

calculada pela relação entre a tensão desvio aplicada e a deformação específica axial resiliente (deformação recuperável).

O ensaio do módulo de resiliência é realizado através da aplicação repetida de uma carga no plano diametral vertical de um corpo de prova cilíndrico regular (Figuras 10). Esta carga gera uma tensão de tração transversalmente ao plano de aplicação da carga, gerando um deslocamento diametral recuperável na direção horizontal correspondente à esta tensão. Esta deformação é obtida a partir dos deslocamentos medidos durante o ensaio, para o posterior cálculo do módulo de resiliência (BERNUCCI et al, 2008).

Figura 10. Execução do Ensaio de Módulo de Resiliência



Fonte: Dados do pesquisador, (2020).

A DNIT 135/2018-ME apresenta as seguintes notas sobre o ensaio:

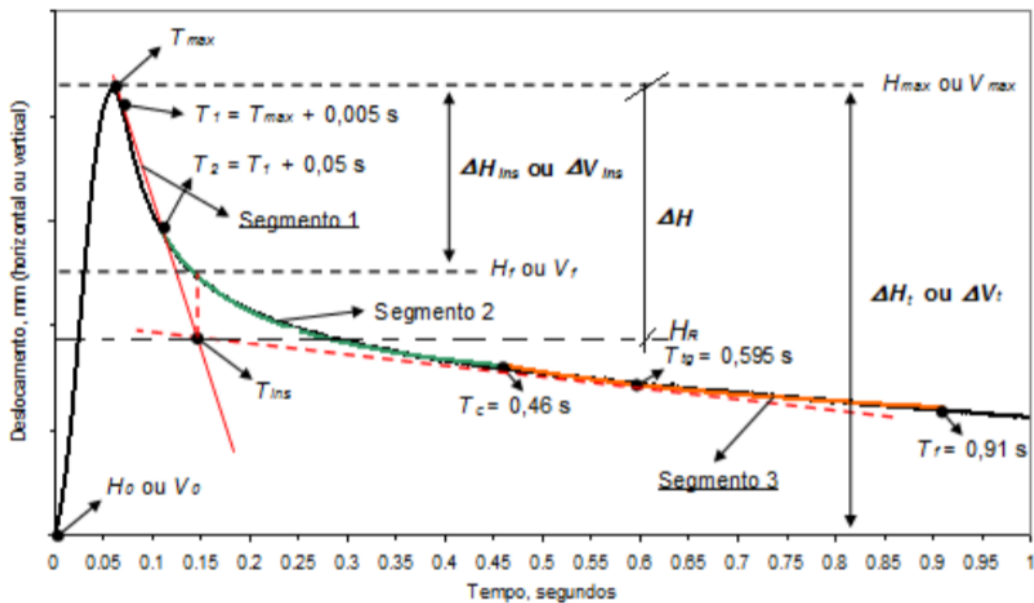
- Recomenda-se o valor de 0,30 para o coeficiente de Poisson, quando não é possível medi-lo;
- O módulo de resiliência do corpo de prova ensaiado será a média aritmética dos valores determinados a partir de 03 ensaios com 15 ciclos de carregamento;
- Quando a temperatura de ensaio não for especificada, o módulo de resiliência deverá ser determinado na temperatura de 25 ± 1 °C.

Para determinação dos valores médios dos módulos é necessário analisar a proposição deste formato de pulso que possui formato de onda que é equivalente ao carregamento proveniente da passagem dos pneus dos veículos. Para tal, o método de

cálculo dos deslocamentos instantâneos e totais é sugerida, subdividindo o pulso de deslocamento.

As porções da curva de deslocamento são divididas em três partes, onde a regressão linear na porção da curva que liga o caminho de descarregamento a porção de recuperação, e a regressão na porção de recuperação dos intervalos de 40% a 90% (de onde deverá ser traçada uma tangente ao ponto correspondente a 55% do período de descanso), definem uma interseção (Figura 11) da qual são retiradas as informações para o cálculo do Módulo de Resiliência. A norma DNIT 135/2018 – ME (Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência) é a responsável pelos parâmetros que regem este ensaio.

Figura 11. Representação Gráfica dos tempos e deslocamentos



Fonte: Norma DNIT 135 – ME, (2018).

O ensaio de MR deve ser realizado através de um equipamento composto por um pistão que proporciona um carregamento repetido pulsante acoplado a um dispositivo regulador de tempo e frequência. Os corpos de prova são de aproximadamente 100 mm de diâmetro e 63,5 mm de altura, moldados no compactador Marshall, ou de 100 mm de diâmetro e altura entre 35 e 65 mm, quando extraídos de pista ou amostras de maiores dimensões. O módulo de resiliência deve ser calculado pela Equação 2.

$$M_R = \frac{P}{|\Delta H| \cdot t} (0,9976\mu + 0,2692) \quad (2)$$

Na qual:

MR – Módulo de resiliência (MPa);

P – Carga vertical repetida aplicada diametralmente no corpo de prova (N);

ΔH – Deformação elástica ou resiliente registrada (mm);

t – Altura do corpo de prova (mm);

μ – Coeficiente de Poisson.

Para esse trabalho, foram realizados ensaios em 03 corpos de prova (L3, L4 e L5), aplicando tensões entre 5% e 25% da resistência à tração por compressão diametral medida. Seus resultados serão avaliados estatisticamente e comparados aos registros da Tabela 6 (item 3.4).

4. RESULTADOS

Para a realização do estudo foram utilizados materiais que estavam sendo usinados em uma obra realizada no município de Ilhéus, onde foram moldados os corpos de prova. Posteriormente, esse material foi encaminhado ao laboratório da instituição, a qual a presente pesquisa se destina, para que fossem realizados os ensaios mecânicos.

Destaca-se que foram avaliados os resultados de Módulo de Resiliência (MR) e Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD) para que se pudesse inferir a qualidade do serviço de usinagem do ponto de vista mecânico, de forma a verificar se o material obtido na coleta está dentro dos padrões de qualidade estabelecidos. Com as proporções de materiais apresentadas na Tabela 5 (item 3.3), a mistura asfáltica de CBUQ estudada neste trabalho apresentou as características descritas na Tabela 7.

Tabela 7. Propriedades da mistura de CBUQ

Teor de ligante	5,30%
Densidade máxima teórica	2,46 g/cm ³
Massa específica aparente	2,376 g/cm ³
Vazios do agregado mineral (V.A.M.)	15,80%
Vazios com betume (V.C.B.)	12,30%
Relação Betume/Vazios (R.B.V.)	78,20%
Volume de vazios (V.V.)	3,40%
Estabilidade à 60 °C	890 kgf

Fonte: Dados do pesquisador, (2020).

A norma DNIT 031/2006 – ES sugere, para o caso de concretos asfálticos aplicados em camadas de rolamento:

- I) volume de vazios entre 3 e 5%;
- II) R.B.V. entre 75 e 82%;
- III) Estabilidade mínima de 500 kgf;
- IV) RTCD a 25 °C mínima de 0,65 MPa; e
- V) V.A.M. mínimo (para misturas com agregados de $D_{\text{máx}}=19,1$ mm) de 15%.

Assim, a mistura de CBUQ estudada neste trabalho atende aos requisitos físicos e volumétricos para o uso e aplicação em obras de pavimentação, ficando seu desempenho dependente apenas de suas propriedades mecânicas, tais como RTCD, e MR, bem como de seu desempenho à fadiga e de sua resistência às deformações permanentes.

4.1. RESISTENCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (RTCD)

Nas Tabelas 8 e 9 são apresentadas as dimensões e os dados obtidos durante o ensaio de RTCD dos corpos de prova L1 e L2.

Tabela 8. Dados obtidos da análise do material coletado (CORPO DE PROVA L1)

Diâmetros (cm)		Alturas (cm)		Carga na ruptura (N)	Carga na ruptura (kgf)	RTCD (MPa)
D1	10,17	H1	6,21	9719,60	991,80	0,98
D2	10,24	H2	6,20			
D3	10,18	H3	6,22			
D4	10,20	H4	6,20			
Média:	10,20	Média:	6,21			

Fonte: Dados do pesquisador, (2020).

Tabela 9. Dados obtidos da análise do material coletado (CORPO DE PROVA L2)

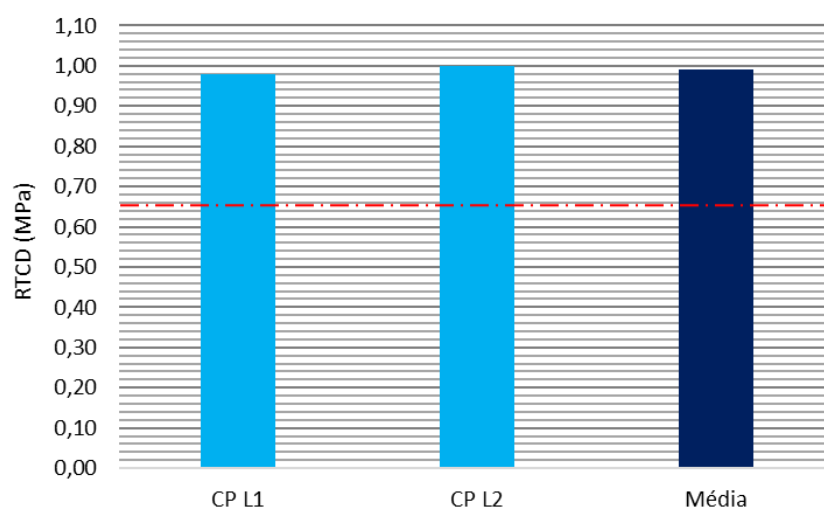
Diâmetros (cm)		Alturas (cm)		Carga na ruptura (N)	Carga na ruptura (kgf)	RTCD (MPa)
D1	10,16	H1	6,19	9941,00	1014,39	1,00
D2	10,14	H2	6,22			
D3	10,16	H3	6,25			
D4	10,14	H4	6,21			
Média:	10,15	Média:	6,22			

Fonte: Dados do pesquisador, (2020).

A média das resistências à tração na compressão diametral obtida para os CP's L1 e L2 foi de 0,99 MPa. O valor de resistência à tração mínimo recomendado pela norma do DNIT 031/2006 – ES para concretos asfálticos e para misturas asfálticas a quente recém compactadas é de 0,65 MPa.

Como pode ser observado na Figura 12, tanto os valores obtidos para cada CP, quanto o valor médio da RTCD foram superiores ao valor mínimo estabelecido em norma, representado na figura pela reta pontilhada. O desvio padrão entre os valores de RTCD dos CP's L1 e L2 foi de 0,014 MPa, e o coeficiente de variação para a amostra foi de 1,43%, o que indica um conjunto de dados homogêneo.

Figura 12. Resultados da RTCD (MPa)



Fonte: Dados do pesquisador, (2020).

4.2. MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MR)

Na Tabela 10 estão apresentados os resultados dos ensaios de Módulo de Resiliência (MR) para os corpos de prova L3, L4 e L5.

Tabela 10. Dados do ensaio de MR

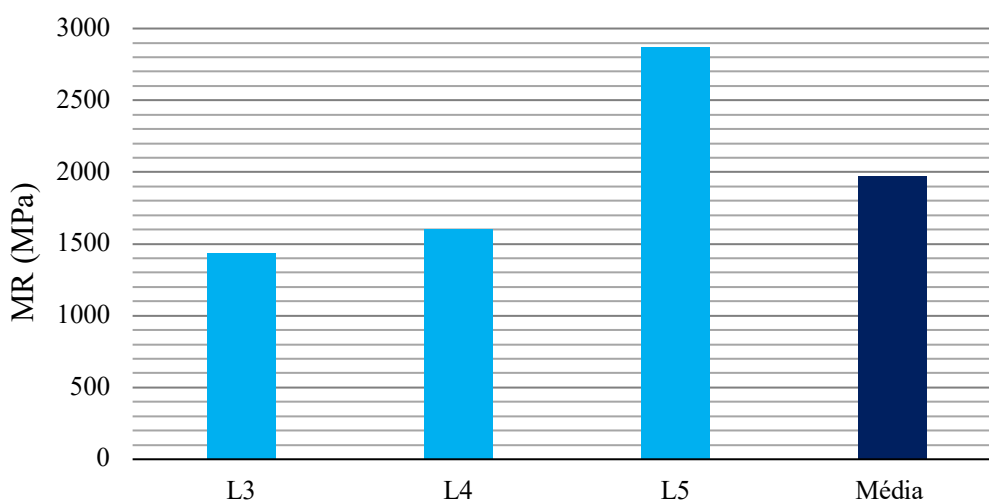
Corpo de Prova	L3	L4	L5
Altura Média [cm]	6,21	6,19	6,25
Diâmetro Médio [cm]	10,13	10,17	10,15
1º Est. de Tensão	15 ciclos	15 ciclos	15 ciclos
Força Aplicada [N]	1467,40	1468,44	1479,76
MR [MPa]	1682,73	1763,96	2244,03
2º Est. de Tensão	15 ciclos	15 ciclos	15 ciclos
Força Aplicada [N]	1956,53	1957,93	1973,02
MR [MPa]	1320,46	1442,01	3033,09
3º Est. de Tensão	15 ciclos	15 ciclos	15 ciclos
Força Aplicada [N]	2445,66	2447,41	2466,27
MR [MPa]	1304,97	1596,18	3328,66
MR CP [MPa]	1436,05	1600,70	2868,60
δ CP [MPa]	213,77	161,000	560,70
CV [%]	14,89	10,10	19,50

Fonte: Dados do pesquisador, (2020).

O valor médio do MR, característico para a mistura de CBUQ deste trabalho, foi de 1968,47 MPa. Puderam ser observados elevados coeficientes de variação parciais na determinação do MR para cada corpo de prova, contudo esses valores não ultrapassaram o limite de 20%.

A Figura 13 apresenta um gráfico com os valores de MR obtidos para cada CP, bem como o valor médio. O desvio padrão entre os valores de MR dos CP's L3, L4 e L5 foi de 783,87 MPa, e o coeficiente de variação para a amostra foi de 39,82%, o que indica um conjunto de dados bastante heterogêneo.

Figura 13. Resultados do ensaio de MR (MPa)



Fonte: Dados do pesquisador, (2020).

Vale destacar que o valor de MR da mistura de CBUQ (1968,47 MPa), quando comparado a valores presentes na literatura e ainda com os valores apresentados na Tabela 11 (baseada na Tabela 6 do item 3.4), mostrou-se bastante abaixo do esperado. Bernucci et al (2008), explica que o MR de CBUQ's varia com diversos fatores, tais como os tipos de mistura e ligantes, a faixa granulométrica, as propriedades volumétricas, a energia de compactação, a temperatura de compactação e de ensaio, entre outros. Ressalta ainda que para concretos asfálticos a 25 °C, os valores típicos de MR podem ser considerados na faixa de 2000 a 8000 MPa, sendo os maiores correspondentes a misturas com asfaltos de consistência dura e os menores correspondentes a misturas com asfaltos modificados por polímeros ou por borracha. O não controle da temperatura de compactação pode acarretar na queda do MR, podendo ser o caso dos resultados deste trabalho, onde o L5 foi o maior, L4 intermediário e L3 o menor.

Tabela 11. Comparação do MR com literatura de referência

CBUQ Faixa C – DNIT	MR = 1968,47 MPa
Soares et al (2000)	MR = 3033,00 MPa
Pinheiro (2004)	MR = 3647,00 MPa

4.3. RAZÃO MR/RTCD

A relação MR e RTCD também foi calculada, obtendo-se o valor de 1988,35. Comparando o valor da razão MR/RTCD obtido para a mistura de CBUQ deste trabalho com os apresentados na da Tabela 12 (baseada na Tabela 6 do item 3.4), verifica-se um valor bastante inferior. A razão entre o MR e a RTCD vem sendo usada apenas como um indicador qualitativo da vida de fadiga de misturas, mas não conclusivo, uma vez que agrega informações de rigidez e resistência, sendo mais desejável um valor menor da razão. Como pode ser observado, o valor foi inferior aos verificados na bibliografia, isso pode ser um indicativo de que esta mistura terá um bom desempenho quanto à fadiga. Contudo, não implica um bom desempenho também quanto à deformação permanente, o que necessita verificação.

Tabela 12. Comparação da razão MR/RTCD com literatura de referência

CBUQ Faixa C – DNIT	MR = 1988,35
Soares et al (2000)	MR = 3425,00
Pinheiro (2004)	MR = 3760,00

5. CONCLUSÃO

O tipo de estudo promovido nessa pesquisa é de grande importância para que se promova conhecimento acerca do controle tecnológico das misturas asfálticas empregadas nas obras de pavimentação, com ganho nos aspectos técnicos e econômicos. Os métodos empregados para que se pudesse realizar as análises referentes a qualidade do material coletado serviu para mensurar possíveis falhas e com isso indicar as formas para solucioná-las.

Além de a mistura atender às diversas exigências normativas estabelecidas pela norma 031/2006 – ES do DNIT, o ensaio de Resistência a Tração por Compressão Diametral resultou em uma resistência média de 0,99 Mpa, superando o valor mínimo de 0,65 MPa estabelecido em norma. Além disso, o Módulo de Resiliência foi de 1968,47 MPa, e a razão MR/RTCD foi igual a 1988,35. A baixa razão MR/RTCD, aliada a alta resistência à tração (RTCD), sugere um bom desempenho da mistura quanto à fadiga, contudo, o baixo valor de MR pode culminar no surgimento de defeitos de superfície devido à baixa resiliência da mistura.

Concluiu-se, portanto, que a qualidade da mistura de CBUQ analisada é boa, embora tenha apresentado um módulo de resiliência baixo (o que pode causar elevadas deformações plásticas/permanentes). O valor da Resistência à Tração por Compressão Diametral propiciou uma boa razão MR/RTCD, o que pode ser favorável para a durabilidade do revestimento do pavimento do ponto de vista de fadiga. Cabe salientar a importância de um estudo complementar da mistura asfáltica quanto ao desempenho na resistência às deformações permanentes.

6. REFERÊNCIAS

ANDOLFATO, R. P. **Controle tecnológico básico do concreto**. Notas de aula. Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2002.

BARRETO, Camila Soares de Melo; SILVA, Lícia Bomfim Oliveira. **Reflexões acerca das principais patologias na repavimentação de trechos devido a obras de saneamento**. Monografia (Graduação). CESMAC, Maceió – AL, 2018.

BERNUCCI, Liedi Bariani. DA MOTA, Laura Maria Goretti. CERATTI, Jorge Augusto Pereira. SOARES, Jorge Barbosa. **Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros**. 2008. 3º Edição. Rio de Janeiro.

BRASIL. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Agregados para concreto – Especificação**. NBR 7211. 2005

BRASIL. Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transporte (DNIT). **Misturas asfálticas a quente – Ensaio Marshall**. Método de Ensaio. DNIT – ME 043/1995.

BRASIL. Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transporte (DNIT). **Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência**. Método de Ensaio. DNIT – ME 135/2018.

BRASIL. Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transporte (DNIT). **Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral**. Método de Ensaio. DNIT – ME 136/2010.

CAPITÃO, S. D. **Caracterização Mecânica de misturas asfálticas de alto módulo de deformabilidade**. Dissertação doutorado (Engenharia Civil). Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 2003.

CAPEL, Lucas. **Pavimento rígido é uma alternativa para corredores de ônibus**. Disponível em <<https://www.engeprest.eng.br/post/2017/09/19/pavimento-rigido-uma-alternativa>>. Acesso em: 17 de março de 2020.

DIAS, C. R. C. **Estudo de misturas de areia-asfalto e cinza-cal para emprego em pavimentos urbanos**. Dissertação (Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

ENGENHARIA LIVRE. **Diferenças entre o pavimento rígido e flexível**. Biblioteca da Engenharia. 2019. Disponível em: <<http://bibliotecadaengenharia.com.br/diferencas-entre-o-pavimento-rigido-e-flexivel/>>. Acesso em: 21 jan 2020.

ESTEVES, S. F. **Reciclagem de pavimentos betuminosos: influência da granulometria nas propriedades mecânicas de misturas recicladas a frio com emulsão**. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014.

FONSECA, P. **Propriedades volumétricas de misturas asfálticas** (com e sem fibras). Tese de mestrado (Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2011.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4 ed. São Paulo: Atlas, 2002.

MARQUES, G.L.O. & MOTTA, L.M.G. **Estudo da influência de alguns fatores na determinação do módulo de resiliência de concretos asfálticos**. In: ENCONTRO DO ASFALTO, 18., 2006, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: IBP, 2006.

NASCIMENTO, L et al. **Uso da tomografia computadorizada e de imagens digitais para o estudo de misturas asfálticas**. In: ENCONTRO DO ASFALTO, 18., 2006, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: IBP, 2006.

NAKAMURA, Juliana. **Pavimentação asfálticas: Os tipos de revestimentos, o maquinário necessário e os cuidados na contratação, projeto e execução**. Dez. 2011. Disponível em: <<http://infraestruturaurbana.pini.com.br/solucoes-tecnicas/16/artigo260588-3.aspx>>. Acesso em: 23 fev. 2020

OLIVEIRA, D. D; ANDRADE, G. S; LAPERCHE, L. A. **Estudo comparativo de concreto betuminoso usinado a quente com diferentes tipos de ligante na região metropolitana de Goiânia**. Trabalho de Conclusão de Curso I (Engenharia Civil). Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

PARANA. Departamento de Estradas e Rodagens – DER. **Norma de Pavimentos Flexíveis e Rígidos**. 2008.

PEREIRA, Adriana Soares et al. **Metodologia da pesquisa científica**. 2018.

PIMENTEL, C. A, A. **Formulação de misturas asfálticas a quente: contribuição para um novo método de formulação**. Dissertação de mestrado (Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia da Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, Lisboa, Portugal, 2013.

SANTOS, J. R. C. **Misturas asfálticas a quente: uma análise à abordagem empírica e fundamental da norma de produto**. Dissertação de mestrado (Engenharia Geológica e de Minas). Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 2016.

SANTOS, P. L; BRANCO, F; PEREIRA, P. **Pavimentos Rodoviários**. Coimbra: Almedina, 2006.

SENÇO, Wlastermiler de, 1929 – **Manual de técnicas de pavimentação**, vol.1, 2.ed, São Paulo: Pini, 2007.

SILVA, A. D. **Formulação de misturas asfálticas a quente: análise comparativa da aplicação de métodos empíricos e volumétricos.** Dissertação (Engenharia Civil). Instituto Superior de Coimbra, Coimbra, Portugal, 2014.

SILVA, Patrícia Tonaco. **Qualidade de Vida Urbana e Mobilidade Urbana Sustentável na Cidade do Porto – Elaboração de um conjunto de indicadores.** 162 p. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2015.

THOMAZ, H. R. et al. **Análise de pavimentação estrutural.** 168f. Universidade Corporativa Caixa, 2002.

WIKIPÉDIA. **Mapa da Bahia.** 2020. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Geografia_da_Bahia>. Acessado em: 17 de março de 2020.