

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO  
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**ANDRESSA CRISTINA BORGES CHAVES**

**AVALIAÇÃO LABORATORIAL DO CAUQ DE APLICAÇÃO A FRIO EM SÃO  
LUÍS-MA, AO LONGO DE SUA VIDA ÚTIL**

São Luís

2019

**ANDRESSA CRISTINA BORGES CHAVES**

**AVALIAÇÃO LABORATORIAL DO CAUQ DE APLICAÇÃO A FRIO EM SÃO  
LUÍS-MA, AO LONGO DE SUA VIDA ÚTIL**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil  
da Universidade Estadual do Maranhão para o grau de  
bacharelado em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Walter Canales Sant'Ana.

São Luís

2019

Chaves, Andressa Cristina Borges.

Avaliação laboratorial do CAUQ de aplicação a frio em São Luís – MA ao longo de sua vida útil / Andressa Cristina Borges Chaves. – São Luís, 2019.

100 f

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Maranhão, 2019.

Orientador: Prof. Dr. Walter Canales Sant'Ana.

1.CAUQ estocável. 2.Vida útil. 3.Propriedades mecânicas. I.Título

CDU: 625.84(812.1)

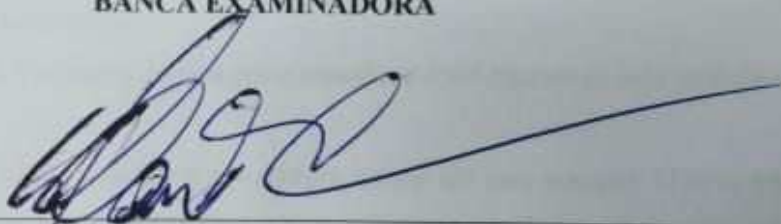
**ANDRESSA CRISTINA BORGES CHAVES**

**AVALIAÇÃO LABORATORIAL DO CAUQ DE APLICAÇÃO A FRIO EM SÃO  
LUÍS-MA, AO LONGO DE SUA VIDA ÚTIL**

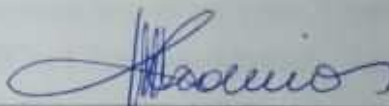
Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil  
da Universidade Estadual do Maranhão para o grau de  
bacharelado em Engenharia Civil.

Aprovado em: 10/12/2019

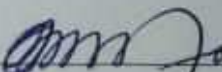
**BANCA EXAMINADORA**



**Prof. Dr. Walter Canales Sant'Ana (Orientador)**



**Prof. Dra. Maria Teresinha de Medeiros Coelho**



**Prof. Msc. Marivaldo Costa Duarte**

## AGRADECIMENTOS

À Deus por me guiar e sempre me dar forças para conquistar meus objetivos, sem Ele, nada disso seria possível.

Aos meus pais Andréa Cristina e Luís Fernando por todo esforço e dedicação para que eu conseguisse ter uma boa educação e assim realizar o meu sonho, agradeço imensamente por todo amor e apoio.

À minha irmã Alice, por todo carinho, companheirismo, incentivo e bom humor, que me manteve firme durante minha caminhada.

Ao meu professor orientador Walter Canales Sant'Ana, pelo apoio, confiança e assistência durante a realização deste trabalho. Agradeço por todos os ensinamentos e incentivos para o crescimento da minha vida acadêmica.

À professora Maria Teresinha, pelo seu excelente trabalho nas disciplinas de pavimentação que proporcionou o meu interesse nesta área. Agradeço por todos os ensinamentos e apoio no laboratório.

Às minhas amigas Veronica e Jéssica pelos conselhos e por estarem ao meu lado durante todos esses anos.

Às amigas que a UEMA me deu e que sempre levarei em meu coração, Malena Melo, Antônia Gessiane, Jasmina Barbosa e todos os outros que acompanharam de perto a minha jornada acadêmica.

Às minhas superiores de estágio Myrla Amorim e Renata Karine, pela compreensão quanto à minha ausência e preocupação para que o meu trabalho não fosse prejudicado.

Agradeço à SEMOSP e à Empresa Maranhão Asfaltos pela disponibilidade dos materiais que foram essenciais para a realização deste trabalho e por permitir que eu acompanhasse de perto o trabalho realizado por eles.

À Universidade Estadual do Maranhão pela oportunidade de fazer o curso, pelo suporte e a cada um dos professores que contribuíram para minha formação acadêmica e profissional.

## RESUMO

A pavimentação asfáltica surgiu como uma necessidade para haver deslocamento seguro de veículos entre dois pontos e por consequência gerar crescimento econômico e social de um determinado lugar. No Brasil, a porcentagem de vias pavimentadas ainda é baixa, de acordo com a Confederação Nacional de Transporte. Em razão disto, surgiram tecnologias a fim de melhorar e aumentar a quantidade de vias pavimentadas, ou até mesmo aumentar a vida útil das rodovias já existentes. Uma destas tecnologias é o Concreto Asfáltico Usinado a Quente de aplicação a frio, também denominado de CAE (Concreto Asfáltico Estocável), que se caracteriza por apresentar em sua composição um aditivo capaz de permitir a mistura ser estocável e aplicada a temperatura ambiente, tornando-a mais acessível e prática. Na cidade de São Luís - MA, o CAUQ Estocável é utilizado principalmente nos serviços de recuperação do pavimento, em operações de tapa-buraco. São fabricados em usina de asfalto a quente, seguindo os mesmos procedimentos do CAUQ convencional, e estocados em sacos de 25 kg, com validade de até 12 meses. O presente trabalho tem como objetivo analisar as propriedades físicas e principalmente mecânicas do ensacado em três etapas ao longo de sua validade: recém fabricado, aos 6 meses e 12 meses. Foi analisado também o comportamento da mistura ao ser submetida as temperaturas de 40°C, 50°C e ambiente durante as realizações dos ensaios mecânicos. Por meio destes ensaios foi possível constatar que o resultado para volume de vazios (Vv) e a Relação Betume/Vazios não atendeu à norma DNER 031/2006 de especificação de serviço do CAUQ, assim como a Resistência à Tração com valor inferior a 0,65 MPa. Após os ensaios laboratoriais, notou-se uma redução da estabilidade a medida que a mistura se aproxima da sua validade limite, além disto, o aumento de temperatura também influenciou nas características do material, que vai perdendo suas propriedades de compactação, prejudicando a qualidade do produto.

**Palavras-chave:** CAUQ Estocável. Vida útil. Propriedades mecânicas.

## ABSTRACT

Asphalt pavement has arisen as a necessity for safe vehicle movement between two points and consequently to generate economic and social growth of a certain place. In Brazil, the percentage of paved roads is still low, according to the National Transport Confederation. As a result, technologies have emerged to improve and increase the number of paved roads, or even extend the life of existing highways. One of these technologies is the cold application of the Hot Mix Asphalt Concrete, also called SAC (Stable Asphalt Concrete), which is characterized by its additive capable of allowing the mixture to be stockable and applied at ambient temperature, making the most accessible and practical. In city of São Luís - MA, the stockable HMA is mainly used in pavement restoration services, in stopgap operations. They are manufactured in a hot asphalt plant, following the same procedures as conventional C, and stored in 25 kg bags, valid for up to 12 months. The present research aims to analyze the physical and mainly mechanical properties of bagging in three stages throughout its validity: freshly manufactured, at 6 months and 12 months. It was also analyzed the behavior of the mixture when subjected to temperatures of 40°C, 50°C and ambient during the mechanical tests. Through these tests it was found that the result for volume of voids ( $V_v$ ) and Bitumen / Voids Ratio did not answer the HMA service specification DNER 031/2006 standard, as well as the Tensile Strength less than 0.65 MPa. After laboratory tests, a reduction in stability was observed as the mixture approaches its limit validity. In addition, the temperature increase also influenced the characteristics of the material, which is losing its compaction properties, impairing the quality of the mixture product.

**Keywords:** Stockable HMA . Lifespan. Mechanical properties.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação das misturas em função das temperaturas de usinagem.....	19
Figura 2 – Curva granulométrica de misturas asfálticas com graduação distintas.....	20
Figura 3 – Usina de asfalto CAUQ.....	23
Figura 4 – Ensacado de CAUQ.....	23
Figura 5 – Estocagem do CAUQ.....	24
Figura 6 – Operação Tapa-buraco com CAUQ Estocável.....	24
Figura 7 – Operação Tapa-buraco com AAUQ.....	26
Figura 8 – Textura Superficial da CPA.....	27
Figura 9 – Exemplo de camada de SMA.....	28
Figura 10 – Usina de PMF.....	29
Figura 11 – Exemplo de aplicação de lama asfáltica em Porto Nacional – TO.....	30
Figura 12 – Exemplo de Microrrevestimento.....	31
Figura 13 – Etapas – Aplicação do CAUQ Estocável.....	38
Figura 14 – Agregados constituintes do CAUQ Estocável.....	40
Figura 15 – Conjunto de Peneiras - Ensaio de Granulometria.....	42
Figura 16 – Brita 0 e Pó de Brita.....	42
Figura 17 – Picnômetro com Pó de Brita e Água destilada.....	44
Figura 18 – Pó de Brita inserida no frasco Chapman.....	45
Figura 19 – Separação de 2kg de brita 0 para ensaio.....	47
Figura 20 – Agregados retidos nas peneiras de 6,3 mm e 4,8 m.....	50
Figura 21 – Máquina “Los Angeles”.....	51
Figura 22 – Amostra após o ensaio Abrasão “Los Angeles”.....	52
Figura 23 – Amostra lavada e passada na peneira de 1,7 mm.....	52
Figura 24 – Proveta com solução e agregados do CAUQ.....	54
Figura 25 – Amostra de CAP para ensaio de penetração.....	56
Figura 26 – Penetrômetro com béquer e amostra de CAP.....	56
Figura 27 – Amostra de CAP nos anéis – Ponto de Amolecimento.....	57
Figura 28 – Aquecimento e medição de temperatura - Ponto de Amolecimento.....	57
Figura 29 – Viscosímetro Saybolt-Furol.....	59
Figura 30 – Extrator de Betume – Rotarex.....	60
Figura 31 – Compactador Marshall.....	64



Figura 32 – Prensa Marshall.....	65
Figura 33 – Prensa Marshall.....	67
Figura 34 – CP's após o ensaio de Desgaste Cântabro.....	87

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva Granulométrica - Brita 0.....	70
Gráfico 2 – Curva Granulométrica - Pó de Brita.....	71
Gráfico 3 – Relação Viscosidade x Temperatura – Viscosidade Saybolt-Furol.....	76
Gráfico 4 – Estabilidade para Temperatura de 40 °C.....	84
Gráfico 5 – Estabilidade para Temperatura de 50 °C.....	85
Gráfico 6 – Estabilidade para Temperatura Ambiente.....	86
Gráfico 7 – Desgaste Cântabro.....	89

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Faixa Granulométrica do Concreto Asfáltico .....	21
Tabela 2 – Faixas Granulométricas e características de dosagem para AAUQ com CAP.....	25
Tabela 3 – Massa mínima, por amostra de ensaio de Granulometria.....	42
Tabela 4 – Massa mínima de amostra de ensaio.....	46
Tabela 5 – Graduação para ensaio de Abrasão “Los Angeles” .....	49
Tabela 6 – Carga abrasiva para ensaio Abrasão “Los Angeles”.....	51
Tabela 7 – Dimensões do recipiente de ensaio para ensaio de Penetração.....	55
Tabela 8 – Traço da mistura - CAUQ Estocável.....	62
Tabela 9 – Temperaturas - Moldagem dos CP's.....	62
Tabela 10 – Quantidade de CP's - Ensaio de Estabilidade e Fluência Marshall.....	63
Tabela 11 – Peneiramento Brita 0.....	69
Tabela 12 – Peneiramento - Pó de Brita.....	71
Tabela 13 – Especificação Brasileira de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP).....	75
Tabela 14 – Temperatura x segundos Saybolt Furol.....	75
Tabela 15 – Faixa Granulométrica da mistura.....	77
Tabela 16 – Parâmetros: Traço – Volume (Recém - Fabricado).....	78
Tabela 17 – Parâmetros: dap, DMT, Vv, VCB, VAM e RBV (Recém - Fabricado).....	79
Tabela 18 – Parâmetros: Fator de correção, Estabilidade e Fluência (Recém - Fabricado)...	79
Tabela 19 – Parâmetros: Traço – Volume (12 meses).....	80
Tabela 20 – Parâmetros: dap, DMT, Vv, VCB, VAM e RBV (12 meses).....	81
Tabela 21 – Parâmetros: Fator de correção, Estabilidade e Fluência (12 meses).....	81
Tabela 22 – Parâmetros: Traço – Volume (6meses).....	83
Tabela 23 – Parâmetros: dap, DMT, Vv, VCB, VAM e RBV (6 meses).....	83
Tabela 24 – Parâmetros: Fator de correção, Estabilidade e Fluência (6 meses).....	83

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais aditivos utilizados na fabricação de misturas mornas.....	34
Quadro 2 – Parâmetros para o CAUQ segundo a norma DNER 031/2006.....	78
Quadro 3 – Resultado - ensacado Recém-Fabricado – Estabilidade de Fluência Marshall.....	80
Quadro 4 – Resultado - ensacado de 12 meses – Estabilidade de Fluência Marshall.....	82
Quadro 5 – Resultado - ensacado de 6 meses – Estabilidade de Fluência Marshall.....	84
Quadro 6 – Resultados para Resistência à Tração.....	86
Quadro 7 – Resultados do ensaio de Desgaste Cântabro.....	88

## LISTA DE SIGLAS

% -	Por cento
°C -	Graus Célsius
ABNT -	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAE -	Concreto Asfáltico Estocável
CAP -	Cimento Asfáltico de Petróleo
CAUQ -	Concreto Asfáltico Usinado a Quente
CCT -	Centro de Ciências Tecnológicas
cm -	centímetros
cm <sup>3</sup> -	centímetro cúbico
CNT -	Confederação Nacional de Transporte
CP -	Corpo de Prova
Dap -	Densidade Aparente
DNER -	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DMT -	Densidade Máxima Teórica
DNIT -	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
EAP -	Emulsão Asfáltica de Petróleo
ES -	Especificação de Serviço
g -	gramas
g/cm <sup>3</sup> -	gramas por centímetro cúbico
h -	horas
kgf -	Quilograma-força
mm -	milímetros
MPa -	Mega Pascal
N -	Newton
NBR -	Norma Brasileira
RBV -	Relação Betume/Vazios
SEMOSP -	Secretaria Municipal de Obras e Serviços Públicos
sSF -	Segundos Saybolt Furol
VAM -	Vazios do Agregado Mineral
VCB -	Vazios com Betume
Vv -	Volume de Vazios

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>1.1. Justificativa</b> .....	16
<b>1.2. Objetivos</b> .....	17
1.2.1. Objetivo Geral .....	17
1.2.2. Objetivos Específicos .....	17
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	18
<b>2.1. Misturas Asfálticas</b> .....	18
2.1.1. Misturas Asfálticas Usinadas a Quente .....	19
2.1.1.1. Concreto Asfáltico Usinado a Quente – CAUQ .....	20
2.1.1.2. Concreto Asfáltico Usinado a Quente Estocável – CAUQ Estocável .....	22
2.1.1.3. Areia Asfáltica Usinada a Quente .....	25
2.1.1.4. Camada Porosa de Atrito .....	26
2.1.1.5. Stone Matrix Asphalt (SMA) .....	27
2.1.2. Misturas Asfálticas Usinadas a Frio .....	28
2.1.2.1. Pré-Misturado a Frio - PMF .....	28
2.1.2.2. Lama Asfáltica .....	30
2.1.2.3. Microrrevestimento Asfáltico .....	30
2.1.3. Misturas Mornas .....	32
<b>2.2. Dosagem de Misturas Asfálticas</b> .....	34
2.2.1. Dosagem Marshall .....	35
2.3.1. Critérios para execução do tapa-buraco .....	37
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	39
<b>3.1. Revisão bibliográfica</b> .....	39
<b>3.2. Coleta de Amostras</b> .....	39
<b>3.3. Ensaio Laboratoriais</b> .....	40
3.3.1. Análise Granulométrica .....	41
3.3.2. Densidade Real dos Agregados Miúdos .....	43
3.3.3. Determinação da Massa Específica por meio do Frasco Chapman .....	44
3.3.4. Absorção e densidade do Agregado Graúdo .....	46
3.3.5. Abrasão “Los Angeles” .....	48
3.3.6. Equivalente de Areia .....	52
3.3.7. Material Betuminoso: Determinação da Penetração .....	54
3.3.8. Ponto de amolecimento (Método Anel e Bola) .....	56

3.3.9. Viscosidade Saybolt-Furol .....	58
3.3.10. Determinação da Porcentagem de Betume .....	59
3.3.11. Estabilidade e Fluência Marshall .....	61
3.3.12. Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral .....	67
3.3.13. Ensaio Cantabro .....	68
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>69</b>
<b>4.1. Análise Granulométrica .....</b>	<b>69</b>
<b>4.2. Densidade Real dos Agregados Miúdos .....</b>	<b>72</b>
<b>4.3. Agregados – Determinação de Massa Específica por meio do Frasco Chapman.....</b>	<b>72</b>
<b>4.4. Absorção e Densidade de Agregado Graúdo .....</b>	<b>73</b>
<b>4.5. Abrasão “Los Angeles” .....</b>	<b>73</b>
<b>4.6. Equivalente de Areia .....</b>	<b>74</b>
<b>4.7. Material Betuminoso: Determinação de Penetração .....</b>	<b>74</b>
<b>4.8. Ponto de Amolecimento (Método Anel e Bola) .....</b>	<b>74</b>
<b>4.9. Viscosidade Saybolt-Furol .....</b>	<b>75</b>
<b>4.10. Determinação da Porcentagem de Betume .....</b>	<b>76</b>
<b>4.11. Estabilidade e Fluência Marshall .....</b>	<b>77</b>
4.11.1. Resultados para o Ensacado Recém-Fabricado .....	78
4.11.2. Resultados para Ensacado de 12 meses .....	80
4.11.3. Resultados para o ensacado de 6 meses .....	83
4.11.4. Representação Gráfica para as Estabilidades encontradas .....	84
<b>4.12. Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral.....</b>	<b>86</b>
<b>4.13. Ensaio Cântabro.....</b>	<b>87</b>
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>90</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>92</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>96</b>
<b>ANEXO A - ESPESSURA DO CORPO-DE-PROVA.....</b>	<b>100</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A malha rodoviária brasileira, segundo a Pesquisa CNT de Rodovias de 2018, é responsável pelo deslocamento de aproximadamente 90% de passageiros e mais de 60% do transporte de cargas, desempenhando um papel fundamental no desenvolvimento social e crescimento econômico do país. Para que seja possível o desenvolvimento socioeconômico, é necessário que o pavimento apresente bom estado de conservação e esteja adequado às especificações de projeto.

Apenas 12,4% das rodovias do Brasil são pavimentadas, considerada uma extensão muito reduzida em comparação ao total e à relevância deste modal para o país, visto que o transporte de cargas e pessoas é predominantemente por meio da malha rodoviária. Desta forma, grande parte do modal apresenta deficiências agravadas pela sobrecarga de veículos e ausência de manutenção, que geram impactos tanto no conforto dos passageiros como também nos desgastes dos veículos (CNT, 2018).

Um dos defeitos que pode ser ocasionado por conta da sobrecarga de veículos, falta de manutenção e falhas de projeto são os buracos/panelas, formados no revestimento, podendo alcançar camadas inferiores do pavimento. Desta forma, são necessárias medidas emergenciais de restauração e conservação do pavimento, para evitar o agravamento do problema. A restauração de rodovias consiste no reestabelecimento das características técnicas e físico-operacionais do pavimento por meio de medidas que destinam-se a prolongar o período de vida da rodovia e proporcionar uma locomoção mais segura. O principal serviço de restauração de pavimentos, na cidade de São Luís – MA, é o tapa-buraco (conservação corretiva), com a utilização de misturas asfálticas usinadas a quente (RDT, 2017).

Estes fatores contribuíram para o surgimento de novas tecnologias na pavimentação que buscam facilidades para solucionar defeitos e também trazer melhorias nas qualidades funcionais aumentando a vida útil do pavimento e contribuindo para a ligações entre diversas áreas povoadas e até mesmo integração com demais sistemas de transporte (OLIVEIRA, 2017).

Dentre estas tecnologias, tem-se o Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ) de aplicação a frio, também denominado de CAUQ Estocável, caracterizado como mistura ensacada. Esta tecnologia é aplicada ao CAUQ, que é caracterizado por ser um revestimento de alta qualidade composto por mistura com quantidades proporcionais de agregados finos e graúdos e ligante betuminoso (CAP), acrescido de aditivo que permite que este seja estocável e aplicado a temperatura ambiente (SALLES e SILVA, 2018).



O CAUQ Estocável tem processo de fabricação semelhante à mistura convencional, onde a mistura é preparada em uma usina de asfalto, obedecendo às mesmas temperaturas de confecção do CAUQ. De acordo com a apresentação do produto, de empresas fabricantes, este material, com validade de até 12 meses, foi elaborado em vista dos benefícios como: resistência, flexibilidade e principalmente praticidade durante a aplicação. A característica que permite a mistura ser estocada e aplicada a frio, consiste em um aditivo acrescido na porcentagem de CAP que retarda a cura (ou endurecimento) do asfalto (OLIVEIRA,2017).

O material estudado foi obtido na cidade de São Luís – MA, na Usina Maranhão Asfaltos, localizada no Distrito Industrial de São Luís. Nos materiais coletados, foram ensaiados e determinadas suas características físicas e mecânicas, que ao final dos procedimentos apresentaram resultados satisfatórios, para análise física dos agregados e ligante betuminoso, já para as propriedades mecânicas, nem todos os resultados foram de acordo com o especificado pela norma DNER 031/2006 da especificação de serviço do CAUQ.

### **1.1. Justificativa**

Segundo Salles e Silva (2018), o CAUQ (Concreto Asfáltico Usinado a Quente) de aplicação a frio é um material composto por uma mistura de agregados graúdos e miúdos e o CAP 50/70 acrescido de um percentual de aditivo. Os agregados compreendem à pedras britadas e areias de granulometrias estabelecidas por norma.

De acordo com o material de Apresentação – Maranhão Asfaltos (2018), a mistura possui um prazo de validade de até 12 meses, e é estocável em sacos de 25 Kg. É caracterizada por ser uma massa asfáltica de aplicação rápida e fácil em qualquer condição climática. Segundo o mesmo material, esta pode até mesmo ser aplicada na presença de água, isto porque o asfalto não necessita de altas temperaturas para ser executado. Deve ser utilizada para serviços de manutenção, como tapa-buracos ou pavimentação de pequenos trechos.

Sua fabricação é realizada por uma usina de asfalto convencional, na qual no processo de usinagem é acrescido 20% de aditivo sob o teor de CAP. O material segue as prescrições da normas de especificação de serviço do CAUQ (DNIT – 031/2006). Por se tratar de uma mistura relativamente nova, o CAUQ Estocável não possui, até o momento do trabalho, uma norma regulamentadora própria quanto às especificações de serviço.

A NBR 031/2006 define “a sistemática a ser empregada na execução da camada do pavimento, estabelecendo os requisitos para os componentes da mistura, bem como para equipamentos, execução e controle da qualidade dos materiais”. Devem ser analisadas as

características físicas e mecânicas para que o CAUQ Estocável seja considerada uma mistura adequada para utilização e em conformidade com a norma e de qualidade.

O prazo de validade é estabelecido por ser o período máximo em que a mistura mantém sua característica de ser estocável e não perde as propriedades ligantes. Partindo deste ponto, o presente trabalho irá analisar as características físicas e principalmente mecânicas do material ensacado ao longo deste prazo (MARANHÃO ASFALTOS, 2018).

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo Geral**

Avaliar características físicas e mecânicas do CAUQ Estocável de aplicação a temperatura ambiente durante o período de validade da mistura de até 12 meses.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Efetuar a caracterização e propriedades físicas dos agregados, graúdos e miúdos;
- Efetuar a caracterização e propriedades físicas do ligante asfáltico utilizados no CAUQ Estocável;
- Efetuar a caracterização mecânica da mistura asfáltica de CAUQ Estocável coletado na usina Maranhão Asfaltos.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Misturas Asfálticas

Pavimentos são estruturas de múltiplas camadas, sendo o revestimento a camada externa que possui contato direto com o tráfego e ações climáticas. Esta camada deve se manter estável e resistir aos esforços de contato pneu-pavimento. Os requisitos técnicos de qualidade de um pavimento serão atendidos quando o projeto da estrutura está em conformidade com as normas técnicas e compatível com as camadas inferiores (BERNUCCI et al., 2006).

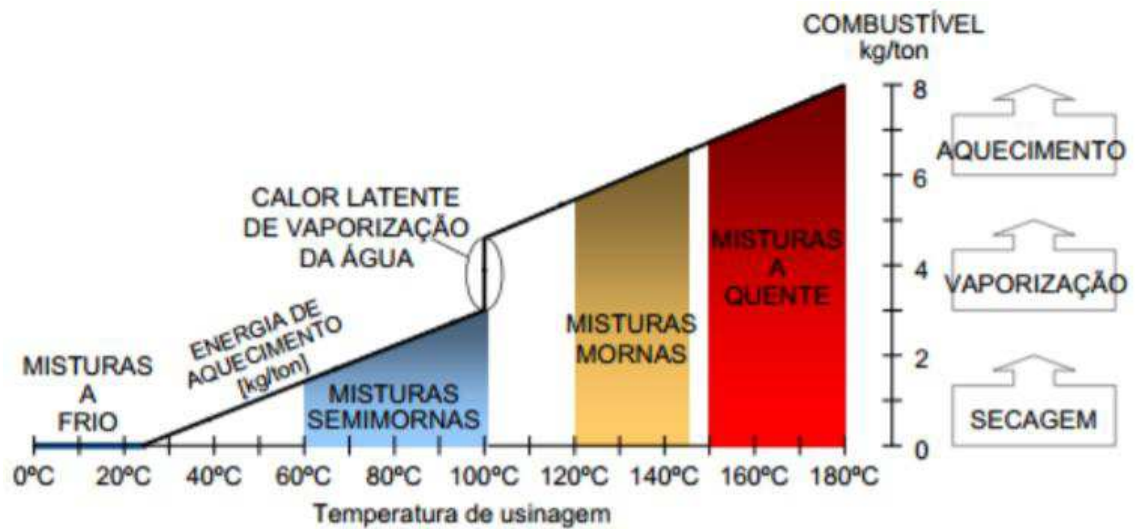
De acordo com Bernucci et al. (2006), na pavimentação brasileira utiliza-se, geralmente, como revestimentos, misturas asfálticas compostas por agregados minerais de várias graduações, associadas com ligantes asfálticos, de forma que juntos atendam às solicitações exigidas no tráfego, como: flexibilidade, resistência à fadiga, impermeabilidade, ou seja, requisitos que garantam a estabilidade do pavimento. O material de revestimento pode ser fabricado por meio de usinas móveis ou fixas (misturas usinadas) ou preparado na própria pista e pode ser identificado quanto ao tipo de ligante, como misturas usinadas a quente quando é utilizado o CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo) ou a fria, com o uso de EAP (Emulsão Asfáltica de Petróleo).

As misturas asfálticas são definidas como “produtos obtidos em usina, a quente ou a fria, envolvendo agregados e ligantes asfálticos, adequadamente proporcionados”. Por meio da graduação dos agregados e características mecânicas pré-definidas, tem-se a caracterização de tipos de misturas, sendo uma das mais utilizadas nos serviços de pavimentação do Brasil o CAUQ (Concreto Asfáltico Usinado a Quente). Na capital maranhense, local de estudo, as misturas mais utilizadas são, o CAUQ, como mistura ensacada, e AAUQ, com uso voltado, principalmente, para serviços de recuperação (ANDRADE, 2012).

Segundo Motta (2011), as misturas asfálticas podem ser classificadas de acordo com a temperatura empregada durante a fabricação, divididas em quatro grupos: misturas a quente, misturas mornas, misturas semimornas e misturas a frio (Figura 01).

A busca por minimizar o impacto ambiental e com maior economia contribuíram para o surgimento de novas tecnologias que mantenham as mesmas características de resistência e estabilidades das misturas convencionais usinadas a quente. Na figura 1, é demonstrado a classificação das misturas em função da temperatura de usinagem, em que é possível perceber uma maior economia em misturas que são fabricadas em temperaturas menores (RELATÓRIO DE PESQUISA – RDT, 2017).

Figura 1 - Classificação das misturas em função das temperaturas de usinagem



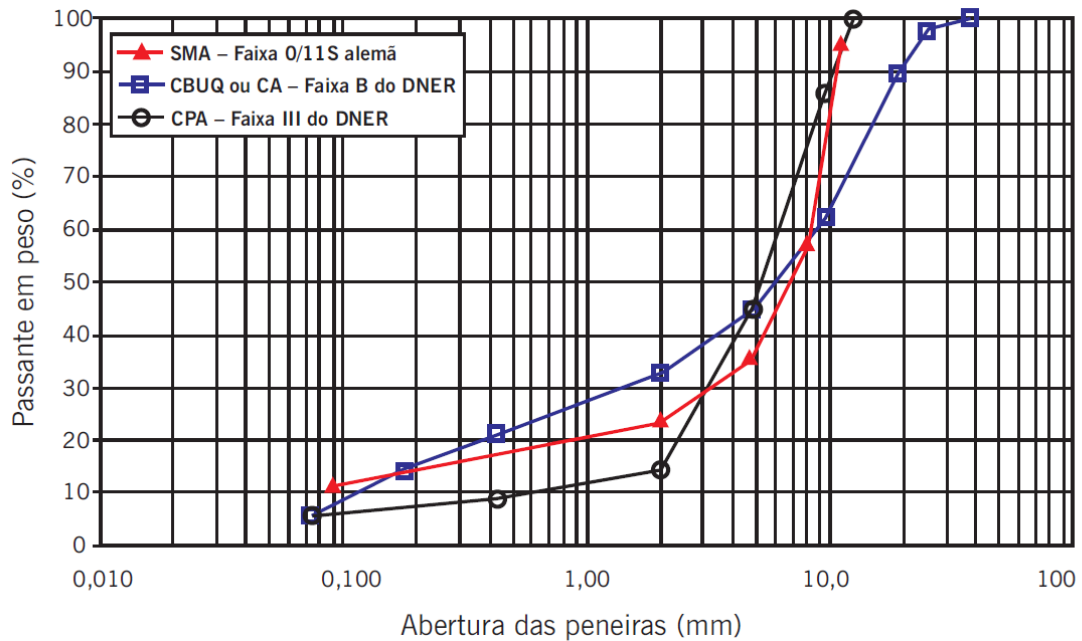
Fonte: D'Angelo et al. (2008), adaptado por Motta (2011)

### 2.1.1. Misturas Asfálticas Usinadas a Quente

De acordo com Bernucci et al. (2006), as misturas asfálticas a quente podem ser subdivididas pela graduação dos agregados e filer, gerando curvas granulométricas demonstradas na Figura 02. Como tipos de graduação de mistura, destacam-se:

- Graduação densa: curva granulométrica contínua e bem graduada, na qual os materiais finos ocupam os vazios da estrutura. Tem-se como principal exemplo o CAUQ;
- Graduação aberta: curva granulométrica uniforme com predominância de agregados do mesmo tamanho, a sua estrutura é caracterizada pela presença de muitos vazios, o que a torna uma mistura com capacidade drenante. Exemplo: CPA (Camada Porosa de Atrito)
- Graduação descontínua: a mistura possui uma descontinuidade quanto a proporção dos grãos, prevalecendo grãos de maiores dimensões, com pequena quantidade de finos a fim de completar a estrutura. Exemplo: SMA (Stone Matrix Asphalt).

**Figura 2 - Curva granulométrica de misturas asfálticas com graduação distintas**



Fonte: Bernucci et al. (2006)

Estes tipos de misturas asfálticas a quente são utilizados como revestimentos de pavimento para qualquer volume de tráfego. O SMA e CPA, são tipos de revestimentos especiais, colocados sobre outras camadas de revestimentos asfálticos ou até mesmo de concreto. São utilizados principalmente para suportar tráfegos de maior volume e de cargas excessivas. Quando a espessura do revestimento excede 70mm é comum a subdivisão em duas camadas, sendo a superior, denominada “capa”, com maior impermeabilidade e a inferior, camada de ligação ou intermediária, pode ser projetada com índice de vazios maior, com finalidade de reduzir o consumo de ligante e o custo da massa asfáltica (BERNUCCI, et al., 2006).

#### 2.1.1.1. Concreto Asfáltico Usinado a Quente – CAUQ

Segundo a norma do DNIT 031 (2006) - Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço, o concreto asfáltico é definido como uma “mistura executada a quente, em usina apropriada, com características específicas composta de agregado graduado, material de enchimento (fíler) se necessário e cimento asfáltico, espalhada e compactada a quente”. A norma estabelece alguns critérios para a fabricação deste tipo de mistura e como

esta deve ser trabalhada em campo, pois o concreto asfáltico necessita de temperaturas maiores que 10° C para ser transportado e aplicado.

Para Bernucci et. al. (2006), o arranjo das partículas, que apresentam uma boa estrutura mineral, permite que a porcentagem de CAP na mistura seja reduzida e que se tenha uma porcentagem de vazios após a compactação, estabelecidas de acordo com a finalidade da camada onde está sendo aplicada a mistura. Estas porcentagens de vazios variam de 3 a 5% para camadas de rolamento e de 4 a 6% para camadas intermediárias ou de ligação. Quanto ao teor de asfalto, a faixa pode variar de 4,5 a 6%, dependendo da forma dos agregados, massa específica dos mesmos, da viscosidade e do tipo do ligante.

A composição da mistura do concreto asfáltico, segundo a norma do DNIT 031 (2006), deve respeitar faixas granulométricas, como mostra a Tabela 1, que variam de A a C, com tolerâncias quanto à porcentagem passante em cada peneira, e teor de CAP, estabelecidos pela seguinte tabela:

**Tabela 1 - Faixa Granulométrica do Concreto Asfáltico**

<b>Peneira de malha quadrada</b>		<b>% em massa, passando</b>			
<b>Série ASTM</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>Tolerância</b>
2"	50,8	100	-	-	-
1 1/2"	38,1	95-100	100	-	±7
1"	25,4	75-100	95-100	-	±7
3/4"	19,1	60-90	80-100	100	±7
1/2"	12,7	-	-	80-100	±7
3/8"	9,5	35-65	45-80	70-90	±7
n° 4	4,8	25-50	28-60	44-72	±5
n° 10	2	20-40	20-45	22-50	±5
n° 40	0,42	10-30	10-32	8-26	±5
n° 80	0,18	5-20	80-20	4-16	±3
n° 200	0,075	1-8	3-8	2-10	±2
Asfalto solúvel no CS2(+) (%)		4,0 - 7,0 Camada de ligação (Blinder)	4,5 - 7,5 Camada de ligação e rolamento	4,5 - 9,0 Camada de rolamento	±3

Fonte: DNIT 031 (2006)

Ainda segundo a norma do DNIT 031 (2006), “a temperatura do cimento asfáltico empregado na mistura deve ser determinada para cada tipo de ligante em função da relação temperatura-viscosidade”. A temperatura do ligante não pode ser inferior a 107°C e nem superior a 177°C, já os agregados devem ser aquecidos a uma temperatura superior em 10 a 15°C da temperatura do ligante, não podendo ultrapassar 177°C.

O CAUQ é um dos revestimentos mais utilizados no Brasil para os serviços de pavimentação. Suas características dependem do teor de CAP presentes na mistura, pois são muito sensíveis à variação do teor de ligante. Caso a porcentagem do ligante exceda o especificado em projeto, podem ocasionar problema de deformação por fluência ou exsudação, com fechamento da macro textura superficial. Por outro lado, a falta de ligante deixa a estrutura menos resistente e suscetível à entrada de água e formação de trincas. A sensibilidade à variação de ligante pode ser controlada, substituindo o CAP convencional por ligante modificado por polímero ou por asfalto borracha (BERNUCCI et al., 2006).

#### 2.1.1.2. Concreto Asfáltico Usinado a Quente Estocável – CAUQ Estocável

Segundo Oliveira (2017), o concreto asfáltico usinado a quente e aplicado a frio também pode ser chamado de CAE (Concreto Asfáltico Estocável). É um tipo de CAUQ acrescido de um aditivo. Existem poucos estudos sobre este tipo de mistura, por se tratar de uma novidade no ramo da pavimentação. Até o momento da elaboração deste trabalho, ainda não foram constatadas normas de especificações para esta mistura, sendo elaborada e seguindo as prescrições das normas de especificação do CAUQ (DNIT 031/2006) e processo de adição do DOPE (DNER-ME 078) e (DNER-ME 079).

De acordo com a Maranhão Asfaltos (2018), este tipo de mistura (CAUQ Estocável) possui características distintas quanto ao processo de aplicação, pois durante a usinagem é acrescentado 20% de aditivo sobre o teor de CAP, que permite o uso prolongado do asfalto mesmo depois de frio. Após o processo de usinagem, o asfalto é armazenado em sacos, para posteriormente, ser aplicado à temperatura ambiente. É uma das principais alternativas para operações de tapa-buraco emergenciais em período de elevada precipitação.

Ainda segundo a Maranhão Asfaltos (2018), o aditivo para o CAP tem sua composição à base de óleo queimado, e tem como finalidade prolongar o tempo de cura da massa, possibilitando que seja estocada, dependendo do tipo, de 12 a 24 meses para ensacada (25 kg), e 12 meses para granel. A figura 3 mostra a usina em que o material é produzido, semelhante à

usina de fabricação para o CAUQ de aplicação a quente. Já na Figura 4, tem-se um exemplo de ensacado de CAUQ.

**Figura 3 - Usina de asfalto CAUQ**



Fonte: Autora (2019)

**Figura 4 - Ensacado de CAUQ**



Fonte: Autora (2019)

As vantagens para utilização do produto expostas pela empresa fabricante, Maranhão Asfaltos, são comuns para os demais fabricantes, são elas:

- Facilidade de aquisição – Pronta entrega em sacos de 25 Kg (manutenção) ou a Granel.
- Massa Asfáltica de aplicação rápida, fácil, instantânea e em qualquer condição climática (inclusive na presença de água).
- Estocável até 12 meses no ensacado, não existem desperdícios, as sobras podem ser armazenadas e reutilizadas.
- Dispensa pintura de ligação e libera a via de imediato para operações de manutenção.
- Permite planejamento e ações preventivas na operação de tapa buraco em seu início, contribuindo para uma manutenção preventiva contínua e possibilitando uma economia de até 20% com mão de obra.
- Diminui necessidade de equipamentos para pavimentação devido a possibilidade de programação de aplicação, podendo utilizar equipamentos mais baratos e econômicos.

A estocagem do material, segundo a empresa fabricante, não pode ultrapassar 10 sacos empilhados (Figura 5), pois a mistura pode entrar em processo de cura por meio de compactação.



**Figura 5 - Estocagem do CAUQ**

Fonte: Autora (2019)

Na cidade de São Luís – MA, o CAUQ Estocável é utilizado pela SEMOSP – Secretaria Municipal de Obras e Serviços Públicos, em operações tapa-buracos (Figura 06), em locais que necessitam de uma intervenção emergencial. As imagens abaixo mostram um serviço realizado na Avenida Getúlio Vargas em São Luís – MA, onde foram recuperadas pequenas panelas existentes ao longo da via. Por ser uma via com alto fluxo de veículos e necessitar de uma recuperação rápida, uma das melhores alternativas foi a utilização do ensacado.

**Figura 6 - Operação Tapa-Buraco com CAUQ Estocável**

Fonte: Autora (2019)

### 2.1.1.3. Areia Asfáltica Usinada a Quente

A norma 032 (2005) - Pavimentos flexíveis – Areia-Asfalto a quente – Especificação de serviço, do DNIT, define Areia-Asfalto a quente como “mistura executada a quente em usina apropriada, com características específicas, compostas de areia (agregado miúdo), material de enchimento (filer) e ligante asfáltico (CAP) espalhado e compactado a quente”. Este material é empregado na prática de argamassas asfálticas, em revestimentos, base e principalmente na regularização de pavimentos.

Assim como no CAUQ, a norma do DNIT 032 (2005), estabelece que a composição da mistura deve satisfazer aos requisitos quanto às faixas granulométricas e respectivas tolerâncias, e ao teor de ligante asfáltico, demonstrado na Tabela 2:

**Tabela 2 - Faixas Granulométricas e características de dosagem para AAUQ com CAP**

Peneiras		Faixas		
		Porcentagem em massa, passando		
		A	B	Tolerância
ABNT	Abertura (mm)	4,75mm	2,0mm	
3/8	9,5	100	-	
n° 4	4,8	80-100	100	±5
n° 10	2	60-95	90-100	±4
n° 40	0,42	16-52	40-90	±4
n° 80	0,18	4-15'	10-47'	±3
n° 200	0,075	2-10'	0-7'	±2
Emprego		Revestimento	Revestimento	
Teor de asfalto		6,0-12,0'	7,0-12,0'	±0,3
% sobre o total da mistura				
Volume de Vazios, %		3,0-8,0		
Relação Betume/Vazios, %		65-82		
Estabilidade, kN, mín.		30		
Fluência, mm		2,0-4,0		

Fonte: DNIT 032/2005, apud Bernucci et al. (2006)

Bernucci et. al. (2006) aponta que a AAUQ, por ser uma mistura com materiais finos, é aplicada para tráfegos não muito elevados, por apresentar menor resistência às deformações permanentes. Na capital maranhense, a massa é utilizada, geralmente, na pavimentação de ruas e operações de tapa-buracos. A Figura 7 mostra a utilização do AAUQ para o preenchimento de panelas, na Avenida Contorno da UFMA, em uma operação tapa-buraco.

**Figura 7 - Operação Tapa-buraco com AAUQ**



Fonte: Autora (2019)

#### 2.1.1.4. Camada Porosa de Atrito

Para Bernucci et. al. (2006), este revestimento também pode ser chamado de revestimento asfáltico drenante, pois possui uma grande porcentagem de vazios devido às pequenas quantidades de fíler, agregado miúdo e ligante asfáltico. O CPA tem como norma regulamentadora a DNER-ES 386/99, que estabelece uma porcentagem de vazios com ar entre 18 e 25%. A CPA é utilizada, principalmente em camadas de rolamento, afim de melhorar a aderência pneu-pavimento em dias de chuva, na qual a água é drenada para o seu interior que é capaz de promover uma alta percolação encaminhando-a para as sarjetas.

Bernucci et. al. (2006), aponta que as características mais importantes deste tipo de revestimento é que ela causa: redução da lâmina d'água na superfície de rolamento, melhora a visibilidade e reduz o spray proveniente do borrrifo causados pelos pneus. Sendo assim, o número de acidentes podem ser reduzidos em dias de chuva. Na Figura 8 é possível identificar a textura da superfície do pavimento.

**Figura 8 – Textura Superficial da CPA**

Fonte: Bernucci et. al. (2006)

A norma do DNER-ES 386 (1999) – Camada Porosa de Atrito, recomenda 5 faixas granulométricas e teor de ligante betuminoso entre 4,0 a 6,0%. Devido à sua característica drenante o teor de ligante asfáltico pode ser reduzido para os valores entre 3,5 a 4,0%. É importante que a camada inferior à CPA seja impermeabilizante, para evitar a entrada de água no interior da estrutura do pavimento.

#### 2.1.1.5. Stone Matrix Asphalt (SMA)

O SMA, identificado na Figura 9, é um revestimento asfáltico usinado a quente, caracterizado por conter uma elevada porcentagem de agregados graúdos, afim de maximizar a interação entre os grãos. Devido a essa característica, o SMA possui uma elevada porcentagem de vazios, que são substituídos por uma porção de areia, fíler e ligante asfáltico, com teor de ligante variando entre 6,0 a 7,5%. É aplicado com espessuras de até 7cm, dependendo da granulometria dos agregados (BERNUCCI et. al., 2006).

Bernucci et. al. (2006), resume as aplicações e principais características do SMA da seguinte forma:

#### **I. Aplicações:**

- Vias com alta frequência de caminhões;
- Interseções;
- Áreas de carregamento e descarregamento de cargas;
- Pistas de aeroportos;



- Rampas, pontes, estacionamentos.

## II. Características:

- Boa estabilidade a elevadas temperaturas;
- Boa flexibilidade a baixas temperaturas;
- Elevada resistência ao desgaste;
- Redução do spray ou cortina de água durante a chuva;
- Redução de ruído ao nivelamento.

**Figura 9 - Exemplo de camada de SMA**



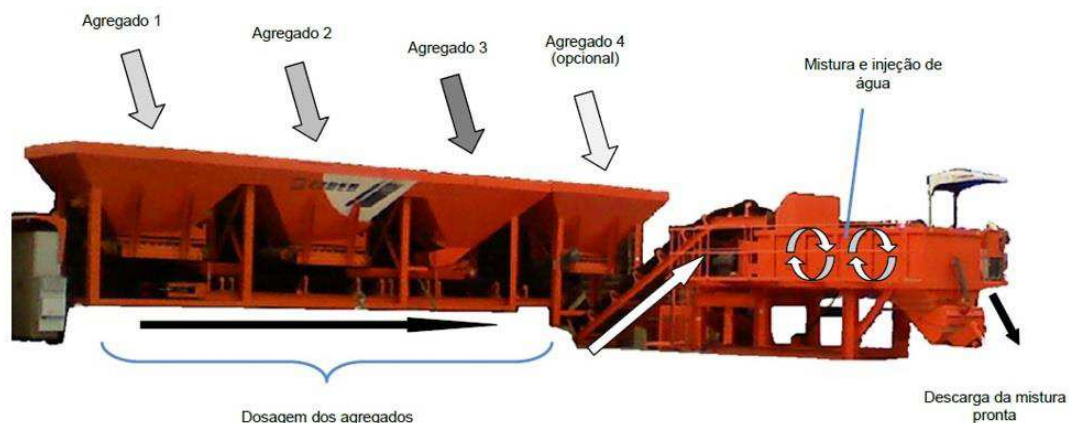
Fonte: Bernucci et. al. (2006)

### 2.1.2. Misturas Asfálticas Usinadas a Frio

#### 2.1.2.1. Pré-Misturado a Frio - PMF

Para Bernucci et. al. (2006), o PMF “consiste em misturas usinadas de agregados graúdos, miúdos e de enchimento, misturados com emulsão asfáltica de petróleo (EAP) à temperatura ambiente”. O PMF pode ser fabricado em usinas (Figura 10) de solo ou brita, usinas de concreto asfáltico sem aquecimento, usinas de pequeno porte com misturadores tipo rosca sem fim, ou usinas horizontais dotadas de dosadores especiais. .

**Figura 10 - Usina de PMF**



Fonte: Gewehr (2015)

As especificações de serviço para o PMF estão prescritas pela norma DNIT 153/2010 - Pavimentação asfáltica – Pré- misturado a frio com emulsão catiônica convencional – Especificação de serviço, ou a norma DNER-ES 390/99 – Pré Misturado a Frio com emulsão modificada por polímero, quando este for constituído de emulsões modificadas por polímeros. O PMF pode ser utilizado em rodovias de baixo tráfego (BERNUCCI et. al., 2006) como também para camadas intermediárias de regularização e reforço da estrutura do pavimento e em serviços de recuperação de revestimentos, os tapa-buracos (OLIVEIRA, 2017, apud ABEDA, 2010).

Santana (1992, apud, BERNUCCI et. al. 2006), define as características do PMF de acordo com a estrutura granulométrica e porcentagens de vazios escolhidos. O autor ainda define o PMF como uma mistura onde os agregados constituintes possuem dimensões variadas, misturados com a emulsão asfáltica e podem ser aplicados e compactados na pista à temperatura ambiente. O mesmo autor estabelece três categorias para execução do revestimento PMF: aberto (pequena quantidade de agregado miúdo e volume de vazios entre  $22 < VV \leq 34\%$ ), semidenso (quantidade intermediária de finos e volume de vazios entre  $15 < VV \leq 22\%$ ) e denso (boa quantidade de materiais de enchimento apresentando volume de vazios entre  $9 < VV \leq 15\%$ ), diferenciando-se pela faixa granulométrica e porcentagem de vazios.

Para Bernucci et. al. (2006), os PMFs podem apresentar espessuras em camadas compactadas de 30 a 70mm. Para maiores espessuras deve haver compactação por camadas. A sua aplicação deve ser à temperatura ambiente, com utilização de equipamentos como vibroacabadora, para realizar o espalhamento da mistura e posterior compactação.

### 2.1.2.2. Lama Asfáltica

Consiste em uma associação de agregados, material de enchimento ou fíler, emulsão asfáltica e água, usinadas e aplicadas a temperatura ambiente. A sua aplicação se dá, geralmente, na recuperação superficial de pavimentos, utilizadas como impermeabilizantes para evitar entrada de água pelas trincas dos pavimentos. A lama asfáltica não pode ser utilizada para tráfegos médios ou altos, por não possuir boa capacidade estrutural, sendo assim, aplicada em vias de baixo tráfego, como ruas, vias secundárias e até mesmo como capa selante para pavimentos de superfície envelhecida (BERNUCCI et. al., 2006).

De acordo com Bernucci et. al. (2006), a lama asfáltica é processada em usina especiais móveis, dividida em silos de agregado, emulsão (de ruptura lenta) e um depósito de água e fíler. Estas são misturadas em proporções adequadas para posterior aplicação, demonstrada na Figura 11, e compactação, apresentando ao final espessuras variando entre 3 a 4mm. As especificações de serviço são dadas pela norma DNER-ES 314/97 – Lama Asfáltica, onde são estabelecidas as faixas granulométricas e porcentagens de ligante e água.

**Figura 11 - Exemplo de aplicação de lama asfáltica em Porto Nacional - TO**



Fonte: Oliveira, 2017

### 2.1.2.3. Microrrevestimento Asfáltico

O microrrevestimento asfáltico utiliza dos mesmos princípios da lama asfáltica, porém mais evoluído, com a utilização de emulsão modificada com polímeros, para aumentar sua vida útil e eventual aplicação de fibras. Da mesma forma como na lama asfáltica, o

microrrevestimento é fabricado por meio de usinas móveis, com a separação dos silos de agregados e emulsão asfáltica, depósito de água e fíler. (BERNUCCI et. al. 2006 apud ABNT NBR 14948/2003).

Segundo Bernucci et. al. (2006), a vantagem de aplicação do microrrevestimento é que pode haver a liberação do trânsito em pouco tempo devido à sua rápida ruptura. Esta mistura é mais utilizada na recuperação de pavimentos, capa selantes, revestimento de pavimento de baixo tráfego. Tem-se o exemplo de Microrrevestimento na Figura 12.

**Figura 12 - Exemplo de Microrrevestimento**



Fonte: VAZ (2014)

O microrrevestimento asfáltico a frio pode ser considerado uma evolução da lama asfáltica por ser constituído de emulsão asfáltica modificada por polímero. A emulsão utilizada contém polímeros elastoméricos (SBR ou SBS). O tempo de cura da mistura é influenciada pela proporção do fíler (cal hidratada ou cimento Portland), pela utilização de aditivos com os agregados ou com as condições climáticas de aplicação na obra (CERATTI; REIS, 2011 apud RELATÓRIO DE PESQUISA RDT, 2017).

Os polímeros elastoméricos tem a função de deixar a mistura mais elástica o que confere a esta uma maior vida útil, além disso, tem a capacidade selante em trincas, impedindo a entrada de água no pavimento, o que conserva o pavimento. Estes polímeros conferem à mistura uma maior adesividade entre o ligante asfáltico e os agregados (ISSA, 2016 apud RELATÓRIO DE PESQUISA RDT, 2017).



### 2.1.3. Misturas Mornas

Este tipo de mistura surgiu como uma forma de economizar energia com o mesmo desempenho das misturas usinadas a quente. Além de reduzir o consumo de combustíveis e consequentemente reduzir a emissão de gases poluentes na atmosfera. As misturas asfálticas mornas ou Warm Mix Asphalt – WMA, diferem das misturas usinadas a frio e a quente por serem produzidas a temperaturas variando entre 105 e 135 °C (SILVA, 2015).

As misturas asfálticas mornas são fabricadas em temperaturas que não se enquadram nas misturas frias (temperatura de usinagem entre 25° a 55 °C) ou misturas quentes. A temperatura de fabricação varia de 105° a 145 °C (BERNUCCI et al., 2010).

As misturas mornas ou semimornas tem esta denominação devido à temperatura de usinagem de misturas a quente que são fabricadas e compactadas a temperaturas inferiores as usuais. Para que a temperatura possa ser reduzida, são necessárias técnicas ou produtos, como: (i) técnica de asfalto espuma, (ii) aditivos orgânicos, (iii) aditivos químicos surfactantes. Estes são aplicados durante o processo de usinagem (CERATTI et al., 2015). Estes procedimentos podem até mesmo ajudar contra o envelhecimento do ligante asfáltico. Esta diminuição compensa os materiais já envelhecidos quando utiliza-se asfalto reciclado (D'ANGELO et al., 2008 apud RELATÓRIO DE PESQUISA RDT, 2017).

Segundo Oliveira (2017 apud PROWELL e HURLEY, 2007), a redução dessa temperatura podem trazer benefícios como:

- Diminuição da emissão de gases poluentes;
- Melhoria no ambiente de trabalho na pavimentação;
- Economia de energia;
- Benefícios para o pavimento, como: retardo no envelhecimento do asfalto e melhores condições para aplicação em climas frios ou locais distantes.

Motta (2011), explica que as misturas mornas são fabricadas a partir da utilização de elementos, que proporcionam uma temperatura reduzida no processo de usinagem, são eles:

- **Espumejo do Asfalto**

Este elemento é obtido a partir da adição de água na mistura com asfalto quente, fazendo com que a água tenha rápida expansão e se torne vapor, desta forma reduz a viscosidade da mistura. A autora descreve que esta já era uma técnica utilizada anteriormente, quando se

utilizava o asfalto espumado como ligante de solo. As usinas devem ser apropriadas para o preparo dessa mistura, com dispositivos para injeção de água (MOTTA, 2011). A água é introduzida no processo de usinagem por injeção direta, e ao se dispersar no asfalto aquecido esta se torna vapor e há a expansão do ligante, que resulta na diminuição da viscosidade da mistura (PROWELL e HURLEY, 2007, apud MOTTA, 2011).

O emprego desta técnica na fabricação de misturas mornas e semimornas requer adaptações nas usinas, com instalação de equipamentos que permitam a injeção de água no processo de fabricação do asfalto. A temperatura pode ser reduzida em até 50 °C dependendo do tipo de tecnologia.

- **Aditivos orgânicos / ceras**

Motta (2011), explica que a introdução de aditivos orgânicos serve para reduzir a viscosidade do asfalto ao interferir nas propriedades dos ligantes. A adição do aditivo deve ser cuidadosamente incorporada na mistura, pois, segundo a autora, o excesso de ligante pode causar o enrijecimento do asfalto assim como a falta pode ocasionar perda da viscosidade do ligante utilizado. Em proporções certas, no processo de usinagem há uma queda de 30 a 40 °C na temperatura e ao final o asfalto apresenta boa rigidez.

- **Aditivos Surfactantes**

Motta (2011, apud PROWELL e HURLEY, 2007), aponta que os aditivos surfactantes “agem na interface agregado/ligante e auxiliam no processo de recobrimento podendo atuar como melhoradores da adesividade”. Estes aditivos não alteram as propriedades dos ligantes asfálticos, como penetração viscosidade e ponto de amolecimento. Devem ser incorporados à mistura no processo de usinagem sob agitação, assim como os aditivos orgânicos, este pode reduzir a temperatura em 30 a 40 °C. A adição do aditivo surfactante no ligante pode ser feita antes da usinagem da mistura ou durante o processo, não necessitando de adaptações por ser um processo simples.

O Quadro 1 apresenta um dos principais aditivos utilizados e processos empregados na fabricação de misturas mornas.

**Quadro 1 - Principais aditivos utilizados na fabricação de misturas mornas**

<b>Aditivo</b>	<b>Processo</b>	<b>Experimento (Campo C ou Laboratório L)</b>	<b>Redução de Temperatura (°C)</b>	<b>Referências</b>
Sasobit	Aditivo Orgânico	C/L	20 a 40	Sampath (2010); Prowell & Hurley (2007); Zhang (2010); Hurley et al. (2009); Sullivan (2009)
Evotherm ET	Aditivo Químico	C/L	20 a 30	Zaumanis (2010); Sampath (2010); Prowell & Hurley (2007); Davidson (2008); Zhang 92010); Hurley et al. (2009)
Rediset WMX	Aditivo Químico	C/L	20 a 30	Zaumanis (2010); Kristjansdottir (2006); Sampath (2010)
Aspha-min	Espuma Indireta	L	até 50	Kristjansdottir (2006); Hurley et al. (2009)
WAM Foam ®	Espuma	L	até 50	Kristjansdottir (2006)
Zeólita	Espuma Indireta	C/L	até 50	Prowell & Hurley (2007)
Advera Synthetic Zeolite	Espuma Indireta	C/L	até 40	Zhang (2010); Sullivan (2009)
Cecabase RT	Aditivo Químico	L	20 a 30	Sheth (2010)

Fonte: Adaptado de Budny, 2012 apud RELATÓRIO DE PESQUISA RDT, 2017

## **2.2. Dosagem de Misturas Asfálticas**

A dosagem de misturas asfálticas consiste na escolha de um teor ótimo de ligante, a partir de uma faixa granulométrica predefinida. O teor ótimo de ligante asfáltico varia de acordo com o método de dosagem, dependendo da energia de compactação, tipo de mistura, temperatura ao qual o pavimento estará submetido, entre outros. O método Marshall é o mais utilizado na confecção de corpos de prova, na qual o material é submetido a vários impactos afim de demonstrar, com mais segurança, o que acontece na prática nas vias urbanas (BERNUCCI et. al., 2006).

### 2.2.1. Dosagem Marshall

Segundo Bernucci et. al. (2006), a execução do método Marshall para dosagem de misturas deve seguir os seguintes procedimentos:

1. Determinação das massas específicas dos agregados e ligante asfáltico que compõem a mistura;
2. Seleção da faixa granulométrica a ser utilizada;
3. Escolha da composição dos agregados, onde devem ser determinadas porcentagens de cada agregado que devem se enquadrar numa faixa granulométrica. Neste momento o teor de ligante não é considerado, sendo assim,  $\Sigma \%n = 100\%$  (onde “n” varia de 1 ao número de diferentes agregados na mistura);
4. Escolha das temperaturas de mistura e compactação, a partir da curva de viscosidade-temperatura do ligante asfáltico. A temperatura do ligante (CAP) não deve ser inferior a 107 °C nem superior a 177 °C. A temperatura dos agregados deve ser de 10 a 15 °C acima da temperatura do ligante, sem ultrapassar a temperatura de 177 °C;
5. Aplicação de diferentes porcentagens de ligante asfáltico em grupos de misturas asfálticas para moldagem dos corpos de prova. Cada grupo com no mínimo 3 CPs. Neste processo, os corpos de provas são moldados e deixados descansar para desmoldagem;
6. Após o resfriamento e desmoldagem, são retiradas as dimensões dos corpos de prova (diâmetro e altura). Além disto, são determinados as massas seca (Ms) e submersa (MSUB). Estes valores servem de base para determinação da massa específica do corpo de prova e massa específica máxima teórica (DMT);
7. Ajuste da porcentagem de agregados com o acréscimo do teor de ligante na mistura, que resultará no  $\Sigma \%n = (100\% - \%asfalto)$ ;
8. A partir dos valores obtidos, são calculados os parâmetros volumétricos que consistem em: Volume de vazios; Porcentagem e massa dos agregados; Vazios do agregado mineral; Relação betume-vazios;
9. Os corpos de prova são levados ao banho-maria a 60 °C por 30 a 40 minutos. Após submersos, são levados diretamente à prensa Marshall, onde serão determinados os parâmetros de: Estabilidade (N) e Fluência (mm). A partir dos parâmetros obtidos, faz-se uma relação com o teor de ligante na mistura para geração das curvas da dosagem Marshall.

### **2.3. Processo de recuperação: Operações tapa-buracos/Remendos**

A operação tapa-buraco é uma correção emergencial, em área localizada no pavimento, por meio de lançamento de mistura asfáltica sobre a panela. Estas operações são realizadas pela Secretaria Municipal de Obras e Serviços Públicos (SEMOSP). Para a capital do Maranhão, as equipes tapa-buracos são compostas pelas equipes da Central, empresa terceirizada, e as da SEMOSP (Casa). São constituídas, geralmente, de 1 encarregado, 1 medidor e 5 ajudantes.

O Manual de Pavimentação (2006), explica que o tapa buraco consiste em “reparar degradações localizadas (panelas, depressões secundárias, etc.) no revestimento, de modo a evitar maiores danos ao pavimento e se obter uma superfície de rolamento segura e confortável”. O termo melhor aplicado para este serviço é o remendo, por exigir uma preparação melhor da panela para receber a mistura asfáltica. Silvera (2017) aponta que, os remendos superficiais são executados de forma provisória, para selar pequenas trincas, diminuindo a probabilidade de entrada de água nas camadas inferiores. Segundo o autor, para este tipo de serviço as misturas mais utilizadas são AAUQ ou capa selante.

As panelas podem atingir profundidades maiores, e desta forma, requer um tratamento mais elaborado. O Manual de Pavimentação (2006), define como remendo profundo aquele em que há a substituição do revestimento e de outras camadas do pavimento, incluindo a remoção de frações granulares dessas. As camadas que serão reconstruídas, devem ser preenchidas por materiais de propriedades adequadas, assim como a substituição do revestimento por misturas asfáltica. As panelas, quando passar por esse processo de restauração, devem ser recortadas, normalmente de forma retangular.

Silvera (2017) complementa que, em caso de remendos profundos, deverá ser preparada uma camada de material de base para assim receber o revestimento. Para ele, este tipo de remendo caracteriza-se como um serviço de restauração no pavimento que possui baixa resistência, com espessura da nova camada acima de 10cm e extensão máxima de 40m.

Recuperações com extensão maiores do que 40m configuram uma restauração do pavimento e a solução deve ser dada através do projeto do pavimento. A necessidade do reparo profundo deve ser definida por inspeção visual do Engenheiro de obras, que deve complementá-la com abertura de janelas para verificar o estado das camadas. (SILVERA. 2017. p.6)

De acordo com a Designação ARTERIS ES 013 (2015), assim como remendo emergencial e profundo, tem-se o remendo corretivo, serviços limitados a pequenas áreas, de

no máximo 10m<sup>2</sup>. São remendos de execução mais simples, considerando apenas a profundidade equivalente a camada de revestimento. Esta operação não pode ser realizada sob chuva, para manter a temperatura da mistura a ser aplicada. Para execução da operação, inicialmente deve ser retirado todo o material solto e recortados de forma retangular, assim como nos remendos superficiais e profundos.

### 2.3.1. Critérios para execução do tapa-buraco

O Departamento de Estradas de Rodagem (DER/PR ES-P 12/05), determina as condições específicas para execução de operações tapa-buraco. Os principais equipamentos utilizados no tapa-buraco manual são:

- Serra corte concreto/asfalto;
- Compactador vibratório;
- Caminhão com caçamba térmica;
- Tanque de emulsão;
- Picareta, enxada, pá, carrinho de mão, vassoura, rastelo e demais ferramentas manuais;
- Equipamentos de proteção individual, como óculos de segurança, colete de sinalização, botina, luvas e outros.

Quanto ao processo de execução do tapa-buraco, Massaro (2015) aponta que cada órgão possui o seu manual, que contém a descrição dos serviços, e deve acontecer de acordo com o seguinte roteiro:

- I. Sinalização do local de trabalho;
- II. Demarcação do perímetro da área degradada;
- III. Corte e remoção do material no formato retangular com distância de 20 cm da borda da panela;
- IV. Limpeza da caixa, retirar todo o material solto e água, de forma a deixa-la seca e limpa;
- V. Aplicar pintura de ligação: o ligante betuminoso (emulsão asfáltica) sob a superfície da camada anterior à execução de uma camada betuminosa, com objetivo possibilitar a aderência entre as camadas (Biazzi et. al. 2016);
- VI. Preenchimento da panela com o material asfáltico (AAUQ ou CAUQ) com espessura situada entre 3cm e 8cm. Para maiores profundidades, deve ser aplicada uma camada com material complementar antes do preenchimento da caixa;
- VII. Compactação final da mistura por meio da placa vibratória;

- VIII. Nivelamento da superfície do remendo em relação à superfície do pavimento;
- IX. Remoção dos equipamentos, limpeza da área e liberação do tráfego.

Na figura 13, demonstram-se as etapas de colocação da massa asfáltica do CAUQ Estocável especificadas pela empresa Maranhão Asfaltos.

**Figura 13 - Etapas – Aplicação do CAUQ Estocável**



Fonte: Maranhão Asfaltos (2018)

### **3. METODOLOGIA**

Para realização do trabalho foram coletados materiais e amostras para execução dos ensaios e análise dos dados. A metodologia consistiu nas seguintes etapas:

- Coleta de amostras;
- Revisão bibliográfica;
- Ensaios laboratoriais físicos e mecânicos;
- Análise dos dados obtidos em ensaios

#### **3. 3.1. Revisão bibliográfica**

Nesta etapa foi realizado o levantamento de livros, artigos, periódicos, dissertações e teses sobre o tema em questão proposto. Além disso, com objetivo de enriquecer o trabalho, serão consultados pesquisadores dos laboratórios que compõem a rede de pesquisa do autor sobre a ocorrência de algum estudo similar em andamento. Foram consultadas normas técnicas para execução dos ensaios laboratoriais físicos, inicialmente nos agregados e ligantes da mistura asfáltica em estudo, CAUQ (Concreto asfáltico usinado a quente) Estocável.

#### **3.2. Coleta de Amostras**

Nesta etapa foram coletadas amostras da mistura CAUQ Estocável, assim como dos agregados e CAP que constituem esta massa. Foram recolhidos um total de 6 sacos de 25 kg da mistura ensacada CAUQ+Aditivo, na Usina da Prefeitura de São Luís localizada na Vila Itamar nas proximidades do Km 0 da BR-135. Os ensacados com “idade” de 6 meses (2 sacos) e 12 meses (2 sacos) foram coletados com antecedência necessária para completar esta validade.

Os agregados constituintes desta mistura (Figura 14): Brita 0, pó de brita e CAP aditivado foram coletados na usina da empresa Maranhão Asfalto, localizada no Distrito Industrial de São Luís. Foram recolhidos cerca de 15 kg de agregado: brita 0 e pó de brita misturados, que posteriormente foram separados ao passar pela peneira de nº 4 (4,8mm), e uma lata de 18 L de CAP. Estes materiais foram encaminhados para o Laboratório de Solos e Pavimentos (LSP) da UEMA, para execução dos ensaios.



**Figura 14- Agregados constituintes do CAUQ Estocável**



Fonte: Autora (2019)

### **3.3. Ensaio Laboratoriais**

Os materiais coletados foram acondicionados no Laboratório de Solos e Pavimentação (LSP) da UEMA e preparados de modo adequado para os ensaios.

Os ensaios laboratoriais foram realizados no Laboratório de Solos e Pavimentação (LSP) da UEMA, pertencente ao Centro de Ciências Tecnológicas (CCT) em São Luís, constando basicamente da caracterização física dos agregados (brita 0 e pó de brita) e do ligante asfáltico (cimento asfáltico de petróleo).

Foram realizados os seguintes ensaios físicos nos agregados: análise granulométrica (DNER-ME 083/98), densidade real dos agregados miúdos (DNER-ME 084/95); Agregados – determinação de massa específica (DNER-ME 194/98); absorção e densidade de agregado graúdo (DNER-ME 081/98), Abrasão Los Angeles (DNER-ME 035/98), Equivalente de Areia (DNER-ME 054/97).

No ligante asfáltico, CAP, foi ensaiado: penetração (DNER-ME 003/99), ponto de amolecimento (Método Anel e Bola) (ABNT NBR – 6560/2000), viscosidade Saybolt-Furol (DNER-ME 004/94).

Nas misturas asfálticas foram ensaiados: Estabilidade e Fluência Marshall (DNER-ME 043/95), Resistência à Tração por Compressão Diametral (DNER-ME 138/95), Determinação do Desgaste por Abrasão Cântabro (ABNT NBR 15140/2004), Determinação da Porcentagem de Betume (DNER-ME 053/94).

### 3.3.1. Análise Granulométrica

O ensaio de análise granulométrica foi realizado, baseando-se na norma DNER-ME 083/98, que consiste em analisar a granulometria de agregados graúdos e miúdos, por peneiramento. Segundo a norma, a dimensão máxima característica do agregado é dado pela porcentagem igual ou imediatamente inferior a 5% em massa.

#### I. Aparelhagem

- Peneiras de malha quadrada conforme a DNER-NE 035/95;
- Balança com capacidade de 20 kg;
- Estufa para manter temperatura uniforme;
- Escovas para peneiras.

#### II. Procedimentos

Não foi utilizado agitador mecânico de peneiras, sendo peneiramento manual. A amostra foi reduzida, por quarteamento, nas quantidades estabelecidas pela norma de acordo com a dimensão máxima característica do agregado.

A amostra foi seca em estufa (110 °C), posta à temperatura ambiente e determinada a sua massa total. Conforme a norma, as peneiras foram encaixadas previamente limpas, com abertura de malha em ordem crescente. A amostra foi colocada sobre a peneira superior do conjunto e foi feito o peneiramento por agitação manual, feito em movimentos laterais e circulares alternados. Após este procedimento, a amostra retida em cada peneira foi pesada e acumulada até a última peneira do conjunto.

Para definição da granulometria, aponta Tonin (2015), são retirados parâmetros que irão caracterizar o material, são estes: o diâmetro efetivo (D10), ponto característico da curva granulométrica que corresponde ao ponto de 10% em peso total, das partículas menores que ele; Coeficiente de Uniformidade (Cu), que é a razão entre os diâmetros correspondentes a 60% e 10%. Os agregados que apresentam  $Cu < 5$  são denominados uniformes; e com  $Cu > 15$  desuniformes. Para valores de Cu entre 5 e 15 são denominados de medianamente uniformes. Define-se também o Coeficiente de Curvatura (Cv), a partir da relação entre o quadrado de D30 e a multiplicação de D60. Para solos bem graduados, o coeficiente de curvatura deverá estar

entre 1 e 3. Na Figura 15, tem-se o conjunto de peneiras utilizadas no ensaio e na Figura 16 mostram os agregados ensaiados da mistura. Na Tabela 3 encontra-se o peso dos agregados de CAUQ para execução do ensaio.

**Figura 15 - Conjunto de Peneiras - Ensaio de Granulometria**



Fonte: Autora (2019)

**Tabela 3 - Massa mínima, por amostra de ensaio de Granulometria**

<b>Material</b>	<b>Massa mínima da amostra de ensaio (kg)</b>
Brita 0	5,0
Pó de brita	1,0

Fonte: DNER-ME 083/98

**Figura 16 - Brita 0 e Pó de Brita**



Fonte: Autora (2019)

### 3.3.2. Densidade Real dos Agregados Miúdos

O ensaio de densidade real dos agregados miúdos foi realizado segundo a norma do DNER-ME 084/95. De acordo com a norma, “a densidade determinada por este método é a relação da massa de determinado volume de amostra a 25° C para massa de igual volume de água destilada à mesma temperatura”.

#### I. Aparelhagem

- Picnômetro ou outro recipiente adequado, com 500 ml de capacidade;
- Peneiras de abertura de 4,8mm e 0,75mm; balança com capacidade de 2kg;
- Estufa para manter temperatura entre 105 °C e 110°C;
- Termômetro; cápsulas; fonte de calor.

#### II. Procedimentos

Como especificado na norma, foi separada uma porção de agregado miúdo de 1000g e peneirada nas peneiras de abertura de 4,8mm e 0,75mm, e tomado 500g do material retido entre estas peneiras. Após este procedimento a amostra foi levada para estufa até a massa constante. Inicialmente, anotou-se o peso do picnômetro vazio e limpo (a), e logo após foi inserida a amostra retida nas peneiras especificadas (b). Foi colocada água destilada na amostra até cobrir o agregado, indicado na Figura 17, onde é mostrado o picnômetro e a amostra utilizada. Após isso, aqueceu-se o picnômetro durante 15 minutos, para retirada de bolhas de ar. Passado o tempo, o picnômetro foi resfriado a uma temperatura ambiente de 25 °C e preenchido com água destilada até o traço de referência.

**Figura 17- Picnômetro com Pó de Brita e Água destilada**



Fonte: Autora (2019)

Foram determinados o peso do picnômetro e do conteúdo (c). Por fim é determinado o peso do picnômetro mais água destilada (d). A fórmula para cálculo da densidade real é dada por:

$$D_{25} = \frac{b-a}{(d-a)-(c-b)} \quad (1)$$

Onde:

D<sub>25</sub> = densidade real de agregado miúdo, a 25/25 °C;

a = massa do picnômetro vazio, em g;

b = massa do picnômetro mais amostra, em g;

c = massa do picnômetro mais amostra mais água, em g;

d = massa do picnômetro mais água, em g;

### 3.3.3. Determinação da Massa Específica por meio do Frasco Chapman

O ensaio para determinação de massa específica foi realizado segundo a norma do DNER 194/98, que tem por objetivo definir a massa específica dos agregados miúdos, caracterizada pela relação entre a massa do agregado seco em estufa e o volume igual do sólido, incluindo os poros impermeáveis.

#### I. Aparelhagem

- Balança;
- Funil;
- Frasco Chapman.

## II. Procedimento

Seguindo os procedimentos, a norma estabelece que o frasco seja preenchido até a marca de 200 cm<sup>3</sup> e em seguida inserir 500g de agregado miúdo seco no frasco, que deve ser agitado para eliminação das bolhas de ar (Figura 18).

Foi feita a leitura do nível atingido pela água indica o volume, em cm<sup>3</sup>, ocupado pelo conjunto água-agregado.

A fórmula para encontrar a massa específica do agregado miúdo, é dada por:

$$\gamma = \frac{500}{L-200} \quad (2)$$

Onde:

L = leitura do frasco;

$\gamma$  = massa específica do agregado.

**Figura 18 - Pó de Brita inserida no frasco Chapman**



Fonte: Autora (2019)

### 3.3.4. Absorção e densidade do Agregado Graúdo

O ensaio de absorção e densidade do agregado graúdo foi executado em conformidade com a norma do DNER-ME 081/98. Tem como objetivo medir a porcentagem de água que o agregado absorve.

A norma do DNER-ME 081/98, define absorção como o aumento da massa do agregado devido ao preenchimento de seus vazios por água e a densidade como a relação entre o peso da unidade de volume de um agregado e a massa de igual volume de água destilada.

#### I. Aparelhagem

- Balança com capacidade de 20 kg;
- Deve conter dispositivo para manter o recipiente com a amostra suspenso, pelo centro do prato da balança;
- Cesto de arame de abertura de malha 3,0 mm;
- Tanque d'água impermeável apresentando volume suficiente para manter a amostra submersa;
- Estufa capaz de manter a temperatura entre 105 °C e 110 °C;
- Peneiras de 2 mm e 4,75 mm.

#### II. Procedimento

A amostra foi preparada desprezando todo o material passante na peneira 4,8 mm, com massa mínima variando de acordo com a dimensão máxima do agregado. Para amostra estudada, foram separados 2 kg, pois apresenta diâmetro variando de 4,8mm a 9,5 mm, de acordo com a Tabela 4.

**Tabela 4 - Massa mínima de amostra de ensaio**

(continua)	
<b>Dimensão máxima característica do agregado (mm)</b>	<b>Massa mínima da amostra de ensaio (Kg)</b>
12,5 ou menor	2,0

Tabela 4 - Massa mínima de amostra de ensaio

<b>Dimensão máxima característica do agregado (mm)</b>	<b>Massa mínima da amostra de ensaio (Kg)</b>
19	3,0
50	8,0
76	18,0
100	40,0
125	75,0
152	125,0

Fonte: DNER - ME 081/98

Após determinada a massa, a amostra foi lavada sobre a peneira de 4,8 mm e seca em estufa na temperatura variando entre 105 °C e 110 °C (Figura 19). A amostra foi resfriada ao ar livre e determinado o seu peso. Após, o material foi imerso em água durante um período de 24 h, a uma temperatura ambiente. Agitar algumas vezes para retirar as bolhas de ar do material.

Figura 19 - Separação de 2kg de brita 0 para ensaio



Fonte: Autora (2019)

Passadas às 24 horas, a amostra foi espalhada sob um pano absorvente e enxugadas as partículas uma a uma, tendo-se o cuidado para não haver a evaporação de água durante o processo de secagem. Após a operação, foi determinada a massa do material, por meio da balança de precisão na condição saturada de superfície seca.



Com estes valores, é possível calcular a absorção (a) a partir da fórmula:

$$a = \frac{M_h - M_s}{M_s} \cdot 100 \quad (3)$$

Onde:

$M_s$  = massa ao ar, do agregado seco em estufa, em g;

$M_h$  = massa ao ar, do agregado na condição saturada superfície seca, em g;

Imediatamente após o ensaio de absorção, colocou-se o material no recipiente para amostra (cesto de arame) e imerso em água. A haste do recipiente foi acoplada no prato da balança, colocada em nível acima do tanque, e determinou-se a leitura (L). A balança foi previamente zerada, antes do cesto com material for imerso em água, no tanque. A amostra do cesto foi retirada e levada à estufa para secagem até constância de massa e resfriada a temperatura ambiente entre 1 hora e 3 horas ou até que o agregado atingisse uma temperatura conveniente para manipulação. Determinou-se a massa final do agregado ( $M_s$ ).

A densidade aparente do agregado na condição seca em estufa, pode ser calculada a partir da seguinte fórmula:

$$D_{ap} = \frac{M_{brita(seca)}}{V_{brita(imersa)}} \quad (4)$$

Onde:

$D_{ap}$  = densidade aparente;

$M_{brita(seca)}$  = massa, ao ar, do agregado seco em estufa, em g;

$V_{brita(imersa)}$  = volume da brita imersa em água;

### 3.3.5. Abrasão “Los Angeles”

Bernucci et. al. (2006), aponta que no processo de manuseio e execução de revestimentos asfálticos, os agregados estão sujeitos a quebras e abrasão. A abrasão ocorre também durante a ação do tráfego. Os agregados devem apresentar resistência à quebra e degradação, especialmente os agregados localizados próximos ou na superfície do pavimento.

O ensaio realizado para medir a resistência à abrasão do agregado é o ensaio abrasão Los Angeles. Neste ensaio, a amostra é submetida à várias rotações no interior da máquina Los Angeles, induzindo impactos com um número variado de esferas de aço, conforme a faixa granulométrica. A norma do DNER-ME 035/98 – Agregados – determinação da abrasão Los Angeles, determina que o desgaste é expresso pela porcentagem, em peso, do material que passa pela peneira de malha de 1,7mm após o ensaio. O ensaio foi executado no laboratório de Concreto do CCT – UEMA, por apresentar a máquina ‘Los Angeles’.

#### I. Aparelhagem

- Balança com capacidade de pelo menos 20 kg;
- Carga abrasiva, que consiste em esferas de aço com aproximadamente 47,6 mm de diâmetro e peso variando entre 390 e 445 g;
- Estufa capaz de manter a faixa térmica de trabalho entre 105 °C e 110 °C;
- Máquina “Los Angeles”;
- Peneiras de malhas quadradas e aberturas nominais, em milímetros, de acordo com a DNER-ME 0365/95: 76 – 63 – 50 – 38 – 25 – 19 – 9,5 – 6,3 – 4,8 – 2,4 – 2 e 1,7;
- Bandeja com dimensões de aproximadamente (700x500x50) mm;

#### II. Procedimentos

A graduação da amostra para o ensaio foi definida de acordo com a granulometria do material ensaiado. Dentre as graduações A, B, C, D, E, F e G, foi escolhida a graduação C, devido à granulometria da Brita 0, por apresentar diâmetro variando de 4,8 mm a 9,5 mm, como mostra a Tabela 5.

**Tabela 5 – Graduação para ensaio de Abrasão “Los Angeles”**

(continua)

Peneiras Abertura em mm		Amostra - massa parcial em gramas						
Passando em	Retido em	Grad. A	Grad. B	Grad. C	Grad. D	Grad. E	Grad. F	Grad. G
76	63	-	-	-	-	2500±50	-	-
63	50	-	-	-	-	2500±50	-	-
50	38	-	-	-	-	5000±50	5000±50	-

Tabela 5 – Graduação para ensaio de Abrasão “Los Angeles”

(conclusão)

Peneiras Abertura em mm		Amostra - massa parcial em gramas						
Passando em	Retido em	Grad. A	Grad. B	Grad. C	Grad. D	Grad. E	Grad. F	Grad. G
38	25	1250±25	-	-	-	-	5000±25	5000±25
25	19	1250±25	-	-	-	-	-	5000 25
19	12,5	1250±10	2500±10	-	-	-	-	-
12,5	9,5	1250±10	2500±10	-	-	-	-	-
9,5	6,3	-	-	2500±10	-	-	-	-
6,3	4,8	-	-	2500±10	-	-	-	-
4,8	2,4	-	-	-	5000±10	-	-	-
Massas totais em gramas		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10	10000±100	10000±75	10000±50
Nº de rotações do tambor		500	500	500	500	1000	1000	1000

Fonte: DNER-ME 035/98

Ao definir a graduação, a amostra foi lavada e seca em estufa até a massa constante (Figura 20). Depois de seco o material foi peneirado para fornecer as amostras de cada peneira escolhida. Foram separadas 2500 g de material retido nas peneiras de abertura de 6,3 mm e 4,8 mm, e número de rotações do tambor igual a 500. As massas retidas nas peneiras foram misturadas, formando uma amostra de 5000 g, obtendo-se assim a massa da amostra seca, antes do ensaio (mn).

Figura 20 - Agregados retidos nas peneiras de 6,3 mm e 4,8 mm



Fonte: Autora (2019)

A carga abrasiva, a ser usada para cada graduação, é definida pela norma DNER-ME 035/98, como mostra a Tabela 6 abaixo:

**Tabela 6 – Carga abrasiva para ensaio Abrasão “Los Angeles”**

<b>Graduação</b>	<b>Número de esferas</b>	<b>Massa de carga (g)</b>
A	12	500025
B	11	458425
C	8	333020
D	6	250015
E	12	500025
F	12	500025
G	12	500025

Fonte: DNER-ME 035/98

Verificado a limpeza do tambor, a amostra foi colocada juntamente com as esferas abrasivas e cuidadosamente fechado para iniciar o processo de rotação. O tambor gira a uma velocidade de 30 a 33 rpm até completar 500 rotações. Na Figura 21, tem-se a máquina Abrasão Los Angeles na qual foi inserida a amostra juntamente com as esferas.

**Figura 21 - Máquina “Los Angeles”**



Fonte: Autora (2019)

O material foi retirado (Figura 22) e passado na peneira de 1,7 mm, rejeitando-se o material passante. Após, foi lavado e levado à estufa para secagem (Figura 23), por no mínimo 3h. O material foi retirado e definido sua massa, obtendo-se a massa da amostra lavada e seca (m'n).

**Figura 22 – Amostra após o ensaio Abrasão “Los Angeles”**



Fonte: Autora (2019)

**Figura 23 - Amostra lavada e passada na peneira de 1,7 mm**



Fonte: Autora (2019)

A abrasão “Los Angeles é calculada pela seguinte fórmula:

$$A_n = \frac{m_n - m'_n}{m_n} \times 100 \quad (5)$$

Em que:

An = abrasão “Los Angeles” da graduação n, com aproximação de 1%;

n = graduação escolhida para o ensaio;

mn = massa da amostra seca inicial;

m'n = massa da amostra lavada e seca após o ensaio, retida na peneira de 1,7 mm.

### 3.3.6. Equivalente de Areia

O ensaio equivalente de areia, descrito na norma DNER-ME 054/97, tem como objetivo verificar a pureza dos agregados. Determinar a proporção relativa de material argiloso presente nas amostras de agregados miúdos. Equivalente de areia (EA), de acordo com a norma, “é a relação volumétrica que corresponde a razão entre a altura do nível superior da suspensão

argilosa de uma determinada quantidade de agregado miúdo, uma proveta, em condições estabelecidas neste Método”.

## I. Aparentagem

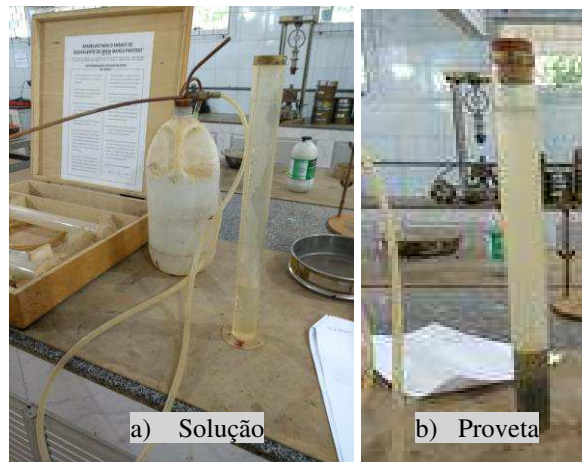
- Peneira de malha quadrada com abertura de 4,8 mm;
- Proveta cilíndrica de 32 mm de diâmetro interno e cerca de 43 cm de altura, que apresente círculo de referência a 10 cm e 38 cm, respectivamente da base;
- Tubo lavador de 6,4 mm de diâmetro externo e 50 cm de comprimento;
- Garrafão com capacidade de 5 L, dotado de sifão constituído de rolha de borracha, como especificado em norma. Este deve ser colocado 90 cm acima da mesa de trabalho;
- Tubo de borracha de 5 mm de diâmetro com pinça de Mohr para interromper o escoamento;
- Pistão constituído de haste metálica e na extremidade uma sapata cônica de 25,4 mm de diâmetro. A sapata possui três parafusos para ajuste na proveta;
- Funil para colocar solo na proveta.
- Régua.

## II. Procedimentos

A amostra é obtida com o material que passa na peneira de abertura 4,8 mm. Foi colocada uma solução (125 ml de solução diluída em 5 L de água), mostrado na Figura 24, em uma proveta até atingir a marca do primeiro traço de referência. O agregado a ser ensaiado foi colocado na proveta e, bateu-se o fundo com a palma da mão firmemente, afim de retirar as bolhas de ar. Após, foi deixado em repouso durante 10 min.

Após o período de 10 min, a proveta foi fechada com rolha de borracha e agitada, num movimento alternado de vaivém, completando 90 ciclos, durante um período de 30 s. A rolha foi retirada e introduzido o tubo lavador, para lavar as paredes do tubo e levantar a argila presente no fundo da proveta. Encheu-se o tubo até a segunda marca (38 mm) e deixou-se repousar durante 20 min. Após o período de descanso, foi aferido o nível da suspensão argilosa da composição com o auxílio de uma régua. O pistão foi introduzido cuidadosamente na proveta, até assentar na areia, e fez-se a medição com base no centro dos parafusos, presentes na haste.

**Figura 24 - Proveta com solução e agregados do CAUQ**



Fonte: Autora (2019)

O equivalente de areia é calculado pela seguinte fórmula:

$$EA = \frac{\text{Leitura no topo da argila}}{\text{Leitura no topo da areia}} \times 100 \quad (6)$$

### 3.3.7. Material Betuminoso: Determinação da Penetração

O ensaio de penetração, segundo Bernucci et. al (2006), “é a profundidade, em décimos de milímetro, que uma agulha de massa padronizada penetra numa amostra de volume padronizado de cimento asfáltico, por 5 segundos, a temperatura de 25 °C”. Este ensaio é regido pela norma DNER-ME 003/99. Em cada ensaio, são feitas três medições individuais de penetração.

Este ensaio foi executado para CAP 50/70. Para CAP Aditivado, este ensaio não apresenta resultado apropriado, devido ao CAP não apresentar consistência necessária para sustentar o peso de 100g da agulha. Logo, o ensaio foi realizado com o CAP sem aditivo.

#### I. Aparelhagem

- Recipiente cilíndrico, no qual a amostra vai ser ensaiada, com dimensões estabelecidas pela norma, como mostra a Tabela 7:

Tabela 7 - Dimensões do recipiente de ensaio para ensaio de Penetração

<b>Para materiais de penetração</b>	<b>Diâmetro interno mm</b>	<b>Altura interna mm</b>
Menor que 200	55	35
Maior que 200 e menor que 350	70	55

Fonte: DNER-ME 003/99

- Penetrômetro, com especificações de acordo com a norma;
- Agulha para penetração, caracterizada pela norma;
- Béquer;
- Água destilada;
- Querosene.

## II. Procedimentos

A amostra de CAP 50/70 foi preparada, aquecendo-se para se tornar fluído, com cuidado para não aquecer a amostra por mais de 30 min. Em seguida a amostra foi colocada no recipiente de ensaio, exposta na Figura 25, fechada para evitar a entrada de poeira e esfriada a uma temperatura entre 15 °C e 30 °C, durante o tempo de 60 minutos a 90 minutos. Após, a amostra foi colocada no banho d'água, mantido a temperatura do ensaio, durante o mesmo intervalo de tempo citados para resfriamento à temperatura ambiente.

O ensaio foi realizado sob as condições, como 25 °C, 100 g e 5 segundos. Em seguida, iniciou-se a leitura da penetração (Figura 26) de forma que a agulha ficasse posicionada entre o centro e uma distância mínima de 1 cm da borda do recipiente. A agulha foi regulada de forma que tangenciasse a superfície da amostra, e assim fez-se a leitura inicial (L0). O aparelho foi pressionado durante 5 segundos, para iniciar a penetração da agulha e obteve-se a última leitura (L). A diferença entre a leitura final e inicial resulta na penetração (H).



**Figura 25 - Amostra de CAP para ensaio de penetração**



Fonte: Autora (2019)

**Figura 26 - Penetrômetro com béquer e amostra de CAP**



Fonte: Autora (2019)

### 3.3.8. Ponto de amolecimento (Método Anel e Bola)

Bernucci et. al. (2006), aponta que, o ponto de amolecimento é uma medida que correlaciona a temperatura na qual o asfalto amolece quando aquecido a uma determinada temperatura e atinge uma condição de escoamento. O autor diz que, trata-se de uma referência semelhante ao chamado ponto de fusão usado na Europa. O ensaio foi realizado em conformidade com a norma da ABNT NBR – 6560/2000 - Materiais betuminosos - Determinação do ponto de amolecimento - Método do anel e bola. Da mesma forma, como no ensaio de penetração, o ensaio de ponto de amolecimento foi executado para o CAP sem aditivo.

#### I. Aparelhagem

- Béquer;
- Anel guia;
- Bola metálica;
- Tela;
- Termômetro;
- Fogão.

## II. Procedimentos

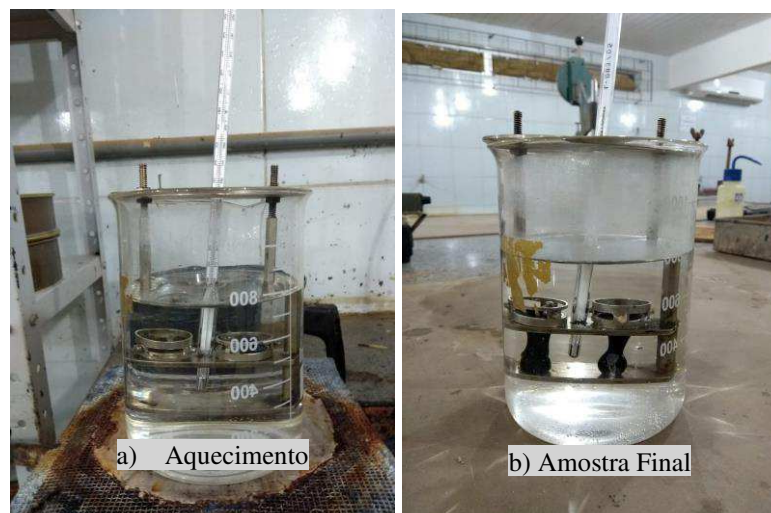
A amostra de CAP fluída, foi colocada sobre os anéis metálicos e deixado em uma superfície para resfriamento (Figura 27), até que se pudesse colocar no suporte. Todo o conjunto foi submerso em água num béquer, inseridas as bolas e levado para o fogão. O termômetro foi introduzido para determinar a temperatura em que o CAP amolece o suficiente para não suportar o peso da bola, expressa na Figura 28. A temperatura foi marcada no instante em que a mistura amolecida toca a placa do fundo do conjunto. O teste foi conduzido com duas amostras de CAP, como mostram as figuras abaixo.

**Figura 27 - Amostra de CAP nos anéis – Ponto de Amolecimento**



Fonte: Autora (2019)

**Figura 28 - Aquecimento e medição de temperatura - Ponto de Amolecimento**



Fonte: Autora (2019)

### 3.3.9. Viscosidade Saybolt-Furol

A viscosidade é a medida de consistência do cimento asfáltico de petróleo, por resistência ao escoamento, explica Bernucci et. al. (2006). Foi utilizado o viscosímetro Saybolt-Furol, do Laboratório de Solos e Pavimentos (LSP) da UEMA. O ensaio consiste em colocar o CAP, a uma determinada temperatura, dentro do aparelho Saybolt-Furol, e determinar o tempo de passagem que uma quantidade deste ligante leva para fluir de um furo padronizado a temperaturas que variam de 121 °C a 232 °C.

As temperaturas são definidas de acordo com as características do CAP a ser estudado. A norma DNER-ME 004/94, estabelece dois métodos, em torno da temperatura, para realização do ensaio. Foi utilizado o método “B” com temperatura variando entre 121 °C e 177 °C. Neste ensaio, marca-se o tempo necessário para encher o recipiente até a marca de 60 ml, tempo dado em sSF (segundos Saybolt-Furol). O procedimento é feito para várias temperaturas, anotando-se os dados para construção de um gráfico. A partir desse gráfico, é possível determinar características como: temperatura do agregado e do ligante para produção da mistura e temperatura de compactação da mistura.

#### I. Aparelhagem

- Fogão;
- Viscosímetro Saybolt-Furol;
- Termômetro;
- Cronômetro;
- Recipiente para coleta;
- Luvas para proteção durante a execução do ensaio.

#### II. Procedimentos

Inicialmente, foram estabelecidas as temperaturas de execução do ensaio, que foram de: 121 °C, 135 °C, 149 °C, 163 °C e 177 °C. O CAP foi previamente aquecido no fogão, de forma que atingisse uma temperatura 10 °C acima da temperatura de ensaio. O viscosímetro Saybolt-Furol possui, na parte interna, um óleo capaz de manter a temperatura do ensaio, podendo ser

ajustada por meio de um painel na parte frontal do aparelho, para que ensaio mantenha a temperatura.

Ao atingir a temperatura, tanto do CAP no fogão, quanto no viscosímetro Saybolt-Furol, a amostra foi transferida para o interior do equipamento. A partir do momento em que o CAP começou a escoar para o recipiente, foi cronometrado o tempo necessário para que o cimento asfáltico atingisse a marca de 60 ml (Figura 29).

**Figura 29 - Viscosímetro Saybolt-Furol**



Fonte: Autora (2019)

### 3.3.10. Determinação da Porcentagem de Betume

Ensaio que consiste num método para determinar a porcentagem de betume em misturas betuminosas extraído por meio de extrator centrífugo (DNER-ME 053/94). A amostra recolhida, passou pelo extrator centrífugo (Rotarex) para a determinação do teor de CAP e faixa granulométrica da mistura.

#### I. Aparelhagem

- Aparelho extrator de betume de acionamento elétrico ou manual. O prato do aparelho centrifugador deverá ter capacidade para receber 1 500 g da amostra e deverá girar a uma velocidade de 3 600 rpm, munido de dispositivo para regular a velocidade;

- Recipiente em aço estampado, em forma de calota esférica, fundo chato e munido de duas alças laterais. Capacidade de cerca de 5 litros;
- Balança com capacidade de 2 kg, sensível a 0,1 g;
- Estufa capaz de manter a temperatura entre 80°C e 120°C;
- Papel de filtro de diâmetro igual ao diâmetro externo do prato e com furo circular, no centro, de 5 cm de diâmetro;
- Colher de metal, com capacidade de 30 a 50 ml. Cabo com cerca de 25 cm.

## II. Procedimentos

Inicialmente, foram separadas 450 g da mistura asfáltica CAUQ Aditivado e levada para o extrator de betume, mostrado na Figura 30, que contém solvente capaz de separar o CAP dos agregados. É colocado papel filtro e o aparelho é acionado, aumentando a velocidade de rotação gradativamente, até que a solução de solvente e betume comece a escoar. Após o escoamento de toda a solução, prepara-se uma nova porção de solvente repetindo o processo até o solvente sair claro. Após este procedimento, o material é retirado do aparelho e deixado para secagem. O agregado depois de seco é pesado. O peso da amostra antes do ensaio menos o do agregado após o procedimento resultará na quantidade de betume da amostra.

**Figura 30 – Extrator de Betume - Rotarex**



Fonte: Autora (2019)

### 3.3.11. Estabilidade e Fluência Marshall

É definido pela norma DNER-ME 043/95 como “método pelo qual se determina a estabilidade e a fluência de misturas betuminosas usinadas a quente, utilizando o aparelho Marshall”. Sendo a estabilidade a resistência máxima à compressão de um corpo de prova e a fluência deformação do mesmo desde a aplicação da carga inicial até a carga final máxima. Este processo é utilizado tanto para projeto de misturas como para controle de campo.

A primeira fase do ensaio consiste em determinar as características dos agregados selecionados, como granulometria, massa específica e porcentagem de vazios, as características físicas determinadas na primeira fase do trabalho. Com agregados e material betuminoso em conformidade com as especificações estabelecidas em norma, é dado início à composição da mistura, na qual os agregados são misturados em proporções de modo que se enquadrem nas faixas granulométricas (DNER-ME 043/95).

Assim que é determinada as proporções de agregados e CAP para compor a mistura, o material é compactado formando corpos de prova, e a partir destes podem ser calculados os seguintes parâmetros: Densidade Real e Aparente ( $D_r$ ), Volume de vazios ( $V_v$ ), Vazios do Agregado Mineral e Relação Betume – Vazios (RBV). A partir destes parâmetros são plotadas curvas em função da porcentagem de CAP, e que serão utilizadas para determinação do teor ótimo de ligante.

#### I. Principal Aparelhagem

- Prensa mecânica ou manual Marshall;
- Molde de compressão de aço;
- Estufa capaz de manter temperatura até 200 °C;
- Balança com capacidade de 5 kg;
- Extrator de corpo de prova;
- Fogão e panela para preparo da mistura;
- Termômetro de haste metálica com mostrador circular;
- Soquete de compactação de aço;
- Paquímetro com exatidão de 0,1 mm;
- Molde de compactação de aço.

## II. Procedimentos

No ensaio de Determinação da Porcentagem de Betume (DNER-ME 053/94), foi determinada a faixa em que a mistura se enquadra, a partir disso, foi definido o traço da mistura, sendo assim a porcentagem de cada componente para a fabricação do asfalto. As porcentagens indicadas se referem ao traço com teor ótimo de CAP definido pela empresa fabricante. A norma DNER-ME 043/95, prescreve que um corpo de prova deve conter massa igual a 1200 g (agregados + ligante), desta forma, foram realizados os cálculos de acordo com a porcentagem para definir a quantidade de cada material. O traço da mistura é mostrado na Tabela 8.

**Tabela 8 - Traço da mistura - CAUQ Estocável**

<b>Material</b>	<b>Porcentagem (%)</b>	<b>Massa (g)</b>
Brita 0	38,00	456,00
Pó de Brita	57,00	684,00
CAP	5,00	12,00

Fonte: Autora (2019)

Além dos traços, foram definidas, por meio do ensaio de viscosidade Saybolt-Furol, as temperaturas de fabricação para o ligante, agregados e compactação da misturas, demonstradas na Tabela 9.

**Tabela 9 - Temperaturas - Moldagem dos CP's**

	<b>Temperatura (°C)</b>
CAP	149
Agregados	159
Compactação CAUQ	Ambiente

Fonte: Autora (2019)

A norma define que sejam preparados pelo menos 3 corpos de provas para o teor de CAP da mistura, neste caso, foram moldados no mínimo 15 corpos de prova para cada ensacado. Isto porque, além de analisar o comportamento mecânico da mistura nas condições normais de compactação e aplicação em campo para este tipo de material, também foi analisado o

desempenho da mistura quando submetidas à temperaturas maiores que a temperatura ambiente, ao serem rompidos.

Por meio de estudo realizado no CAUQ Estocável, foi constatado que a mistura, após compactada, não permanece estável à temperatura de 60 °C, desta forma, foram moldados CP's até a temperatura de 50 °C, afim de verificar a temperatura máxima em que a mistura pode ser ensaiada. A Tabela 10 demonstra a quantidade mínima de corpos de provas moldados relacionando a validade do ensacado e a temperatura de rompimento. O estudo da temperatura foi realizado nas misturas recém-fabricadas e de validade de 12 meses.

**Tabela 5 - Quantidade de CP's - Ensaio de Estabilidade e Fluência Marshall**

<b>Temperatura de Rompimento</b>	<b>Ensacado</b>	<b>Quantidade Mínima dos CP's</b>
Ambiente	Recém-Fabricado	5
	12 meses	5
	6 meses	5
40 °C	Recém-Fabricado	5
	12 meses	5
50 °C	Recém-Fabricado	5
	12 meses	5

Fonte: Autora (2019)

- Procedimentos para moldagem dos Corpos de Prova

Foram separados 1200 g do CAUQ Estocável para moldagem. Por se tratar de uma mistura aplicada a frio, inicialmente a compactação foi a temperatura ambiente. A mistura foi levada ao molde cilíndrico do compactador Marshall (Figura 31) e iniciada a moldagem. A norma estabelece que cada face do corpo de prova seja submetida a 75 golpes.



**Figura 31 - Compactador Marshall**

Fonte: Autora (2019)

Os primeiros corpos de prova não foram bem sucedidos quanto a moldagem, apresentando altura maior que a do molde ao final da compactação. Este mesmo problema foi observado em trabalhos como o de Oliveira (2017) e o de Santana (2016), em que foi estudado o CAUQ Estocável. Para contornar a situação, os autores destes trabalhos reduziram a massa de mistura asfáltica para 1050 g ou aumentaram a temperatura de compactação para 60 °C (considerando massa de 1200g), que, segundo a autora Oliveira (2017), as moldagens mostraram-se mais bem sucedidas comparadas as moldagens a frio.

Desta forma, foram feitas algumas adaptações na norma do DNER-ME 043/95, onde a compactação dos corpos de prova para este trabalho foi realizada na temperatura de 60 °C mantendo o peso inicial de 1200g. A Figura 32 demonstra a mistura de CAUQ Estocável e o corpo de prova após a compactação

**Figura 32 - Massa Asfáltica de CAUQ para compactação**



Fonte: Autora (2019)

Após a compactação, os corpos de prova foram extraídos dos moldes para determinar parâmetros de altura e diâmetro. Além desta medição, também foram retirados os pesos seco e submerso de cada corpo de prova. Os valores obtidos estão presentes no Apêndice A.

Como constatado, o corpo de prova de CAUQ Estocável não pode ser submetido a temperaturas de 60 °C, desta forma foi desconsiderada a etapa de banho-maria. Os corpos de prova foram ensaiados nas temperaturas: Ambiente, 40 °C e 50 °C.

A partir dos valores de altura, diâmetro, massa seca e submersa, é possível determinar os parâmetros (Porcentagem de Vazios, Relação Betume-Vazios, Vazios do Agregado Mineral) estabelecidos pelas normas de especificação de serviço de cada mistura, que as caracterizam como material adequado para utilização. As fórmulas para cálculo dos parâmetros demonstrados abaixo.

- Densidade máxima teórica

$$DMT = \frac{100}{\frac{\%AREIA}{D_{a.g}} + \frac{\%FILER}{D_f} + \frac{\%B}{D_b}} \quad (7)$$

- Densidade do corpo de prova

$$Dap = \frac{V}{V_{cp}} \quad (8)$$

- Percentual de Vazios:  $V_v$  (%)

$$V_v(\%) = \frac{DMT - d_{ap}}{DMT} \quad (9)$$

- Vazios preenchidos de betume:  $VCB$  (%)

$$VCB(\%) = \frac{d_{ap} \times (\%)B}{D_b} \quad (10)$$

- Vazios do Agregado mineral:  $VAM$  (%)

$$VAM(\%) = V(\%) + VCB(\%) \quad (11)$$

- Relação Betume-Vazios:  $RBV$  (%)

$$RBV(\%) = \left( \frac{VCB(\%)}{VAM(\%)} \right) \times 100 \quad (12)$$

- Estabilidade (Kg ou N):

De acordo com a norma DNER – ME 043/95 é definido como ensaio destrutivo na prensa marcando-se no extensômetro do anel dinamométrico o valor atingido até a perda de resistência do corpo de prova. O valor determinado pela máquina deve ser multiplicado pela constante do anel e ainda por um coeficiente relacionado a altura (ou volume) do corpo de prova.

Logo, a estabilidade final é dada pela seguinte fórmula:

$$Est. \text{ final} = Est. \text{ lida} \times Ceq \times Cesp \quad (13)$$

Onde:

Est. Final: Estabilidade Final, (kgf/cm<sup>3</sup>);

Est. Lida: Estabilidade Lida referente ao resultado dado pela prensa, (kgf);

Ceq: Constante do anel equivalente a 1,0;

Cesp: Fator de correção em função da altura do CP, presente no Anexo A.

### 3.3.12. Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral

Este ensaio tem como norma regulamentadora a NBR 138/94, na qual prescreve o método para determinação da resistência à tração de corpos de prova de misturas asfálticas, por meio do ensaio de compressão diametral.

Segundo Junior (2006), no ensaio de resistência à tração por compressão diametral o corpo de prova “ é posicionado diametralmente em relação à direção da compressão resultando numa tração, agindo perpendicularmente ao longo do plano diametral que promove a ruptura da amostra nesta direção”. O ensaio é realizado numa prensa Marshall, exibida na Figura 33, na qual o corpo de prova é submetido a carga na parte superior e inferior.

**Figura 33 - Prensa Marshall**



Fonte: Autora (2019)

#### I. Aparelhagem

- Prensa mecânica, com sensibilidade inferior ou igual a 19,60 N;
- Estufa capaz de manter a temperatura entre 30 °C e 60 °C;
- Paquímetro;
- Soquete de compactação;

#### I. Procedimentos

O ensaio de Resistência a Tração por Compressão Diametral é realizado em corpos de provas, da mesma forma como no ensaio de Estabilidade e Fluência Marshall. Os parâmetros de altura e diâmetro estão presentes no Apêndice B.

### 3.3.13. Ensaio Cantabro

A norma DNER-ME 383/99 apresenta o método de ensaio pelo qual se determina o desgaste, por abrasão, de uma mistura betuminosa a partir da máquina Los Angeles. O corpo de prova é submetido a trezentas rotações no interior da máquina girando a uma velocidade de 30 rpm. O desgaste Cantabro é definido pela razão entre a diferença do peso inicial e o peso final (após o ensaio) sobre o peso inicial. O resultado final é dado em porcentagem (FALCÃO et al, 2006).

#### I. Aparelhagem

- Máquina Los Angeles, sem carga abrasiva;
- Balança com capacidade de 5 kg;

#### II. Procedimentos

Para execução do ensaio, são necessários corpos de prova que serão submetidos às rotações na máquina “Los Angeles”. Foram separados 7 corpos, de medidas demonstradas no Apêndice C.

A fórmula para cálculo do desgaste cântabro é dado pela seguinte fórmula:

$$A = \frac{P - P'}{P} * 100$$

Onde:

A : desgaste da mistura betuminosa, com aproximação de 1%;

P : peso do corpo de prova, antes do ensaio;

P' : peso do corpo de prova após o ensaio.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Análise Granulométrica

- Brita 0

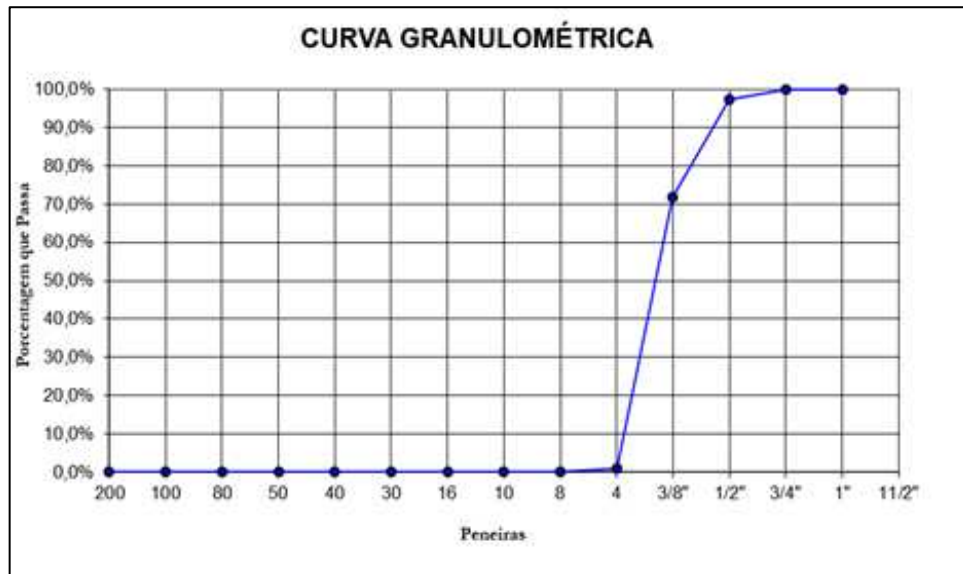
A Tabela 11 demonstra a graduação das peneiras utilizadas, a massa inicial da amostra de Brita 0 e o resultado final que dará origem ao Gráfico 1.

Tabela 11 - Peneiramento Brita 0

Peso total da amostra seca			1000 g		
PENEIRA		MATERIAL RETIDO			PASSANTE
N°	ABERTURA	Peso Parcial	% Simples-Parcial	Porcentagem Acumulada	Porcentagem Amost. Pass.
	(mm)	(g)			
3/4"	19,1	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
1/2"	12,7	139,20	2,78%	2,78%	97,22%
3/8"	9,52	1264,00	25,28%	28,06%	71,94%
4	4,76	3550,50	71,01%	99,07%	0,93%
8	2,4	39,20	0,78%	99,86%	0,14%
10	2	0,00	0,00%	99,86%	0,14%
16	1,19	0,00	0,00%	99,86%	0,14%
30	0,59	0,00	0,00%	99,86%	0,14%
40	0,42	0,00	0,00%	99,86%	0,14%
50	0,3	0,00	0,00%	99,86%	0,14%
Fundo	0	7,10	0,14%	100,00%	0,00%

Fonte: Autora (2019)

Gráfico 1 - Curva Granulométrica - Brita 0



Fonte: Autora (2019)

A partir da curva granulométrica, tem-se:

Def = 4,8 mm

D30 = 7,15 mm

D60 = 9,50 mm

Desta forma, o coeficiente de uniformidade e curvatura são:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{ef}} = \frac{9,5}{4,8} = 1,97$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} * D_{10}} = \frac{7,15^2}{4,8 * 9,5} = 1,12$$

Portanto, como o valor do Coeficiente de Uniformidade ( $C_u$ ) é inferior a 5, conclui-se que o agregado é uniforme. O valor do coeficiente de curvatura ( $C_v$ ), está entre 1 e 3, desta forma definido como bem graduado.

- Pó de Brita

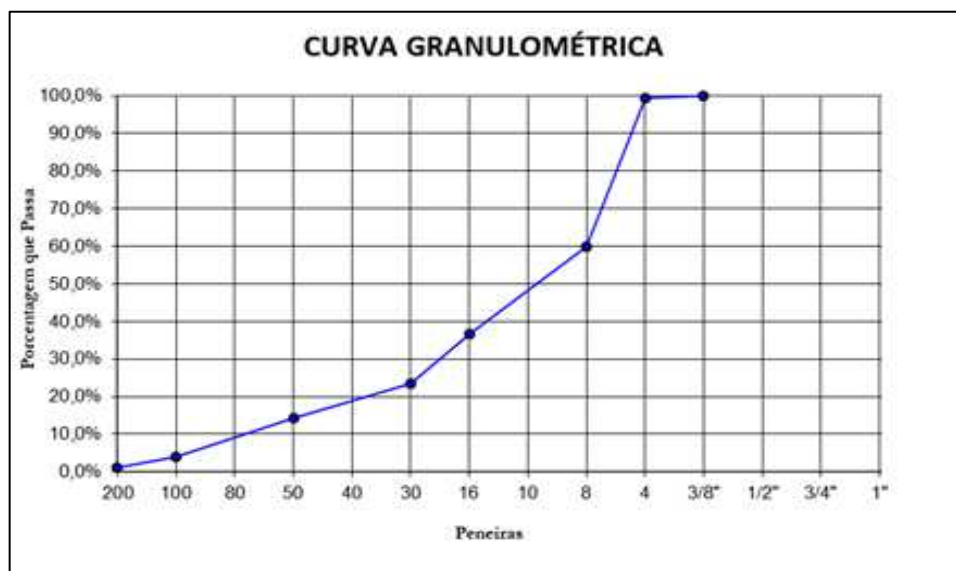
A Tabela 12 demonstra a graduação das peneiras utilizadas, a massa inicial da amostra de Pó de brita e o resultado final que dará origem ao Gráfico 2.

Tabela 12 – Peneiramento - Pó de Brita

Peso total da amostra seca			1000 g		
PENEIRA		MATERIAL RETIDO		PASSANTE	
N°	ABERTURA	Peso Parcial	% Simples-Parcial	Porcentagem Acumulada	Porcentagem Amost. Pass.
	(mm)	(g)			
3/8"	9,52	0	0,00%	0,00%	100,00%
4	4,76	5,80	0,58%	0,58%	99,42%
8	2,4	395,60	39,56%	40,14%	59,86%
16	1,19	230,80	23,08%	63,22%	36,78%
30	0,59	133,40	13,34%	76,56%	23,44%
50	0,3	90,80	9,08%	85,64%	14,36%
100	0,15	104,60	10,46%	96,10%	3,90%
200	0,075	28,20	2,82%	98,92%	1,08%
Fundo	0	10,80	1,08%	100,00%	0,00%

Fonte: Autora (2019)

Gráfico 2 - Curva Granulométrica - Pó de Brita



Fonte: Autora (2019)

A partir da curva granulométrica, tem-se:

Def = 0,21 mm



$$D_{30} = 0,89 \text{ mm}$$

$$D_{60} = 2,40 \text{ mm}$$

Desta forma, o coeficiente de uniformidade e curvatura são:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{ef}} = \frac{2,4}{0,21} = 11,4$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} * D_{10}} = \frac{0,89^2}{2,4 * 0,21} = 1,57$$

Portanto, como o valor do Coeficiente de Uniformidade ( $C_u$ ) está entre 5 e 15, conclui-se que o agregado possui uniformidade média. O valor do coeficiente de curvatura,  $C_v$ , está entre 1 e 3, desta forma definido como bem graduado.

#### 4.2. Densidade Real dos Agregados Miúdos

- Pó de Brita

A fórmula para o cálculo da densidade do agregado miúdo é dado pela seguinte fórmula:

$$D_{25} = \frac{b - a}{(d - a) - (c - b)}$$

Onde:

$$a = 145 \text{ g} / b = 645 \text{ g} / c = 934 \text{ g} / d = 616,5 \text{ g}$$

$$D_{25} = \frac{645 - 145}{(616,5 - 145) - (934 - 645)}$$

$$D_{25} = 2,74 \text{ g/cm}^3$$

#### 4.3. Agregados – Determinação de Massa Específica por meio do Frasco Chapman

- Pó de Brita

$$\gamma = \frac{500}{L - 200} = \frac{500}{381 - 200} = 2,76 \text{ g/cm}^3$$

#### 4.4. Absorção e Densidade de Agregado Graúdo

A absorção do agregado é igual a:

$$M_s = 2000,1 \text{ g}$$

$$M_h = 2020,9 \text{ g}$$

$$a = \frac{M_h - M_s}{M_s} \cdot 100 = \frac{2020,9 - 2000,1}{2000,1} \times 100$$

$$a = 1,03\%$$

Uma vez que o valor de absorção apresentado pelo agregado foi inferior a 2%, ele se mostra como adequado para aplicação nos estudos de dosagem e produção de concreto.

A densidade real aparente do agregado na condição seca em estufa é:

$$M_s = 2000,1 \text{ g}$$

$$V_{imesso} = 722,1 \text{ g}$$

$$D_{ap} = \frac{M_{seca}}{V_{imesso}} = \frac{2000,1}{722,1}$$

$$D_{ap} = 2,77 \text{ g/cm}^3$$

#### 4.5. Abrasão “Los Angeles”

- Brita 0

A abrasão “Los Angeles” do agregado é calculada pela seguinte fórmula:

$$m_n = 5000 \text{ g}$$

$$m'_n = 4070,2 \text{ g}$$

$$A_n = \frac{5000 - 4070,2}{5000} \times 100$$

$$A_n = 18,60\%$$

Portanto, pode-se inferir que o agregado ensaiado é adequado para ser utilizado em revestimento asfáltico, uma vez que obedeceu a inequação  $LA = 18,6\% \leq 50\%$ . De acordo com Bernucci et. al. (2006), “as especificações brasileiras que envolvem o uso de agregados em

camadas de base e revestimento de pavimentos, normalmente limitam o valor da abrasão Los Angeles (LA) entre 40 e 55%.”. O ensaio obteve um resultado satisfatório, com abrasão ao desgaste menor que o limitado por norma.

#### 4.6. Equivalente de Areia

- Pó de Brita

H1 = 10,00 cm

H2 = 6,50 cm

$$EA = \frac{H2}{H1} \times 100$$

$$EA = \frac{6,5}{10} \times 100 = 65,00\%$$

De acordo com as normas de especificações de serviço do DNIT 031/2006, os agregados miúdos devem apresentar equivalente de areia igual ou superior a 55%. Desta forma, os agregados ensaiados, para composição da mistura, apresentam condições para tal fim. O material apresentou resultados satisfatórios.

#### 4.7. Material Betuminoso: Determinação de Penetração

Foram realizadas três leituras de penetração para o ensaio no CAP 50/70 sem a presença de aditivo. Os valores obtidos foram:

1º Penetração: L0 = 318·10<sup>-1</sup> mm e L = 379·10<sup>-1</sup> mm, sendo P1 = 61·10<sup>-1</sup> mm

2º Penetração: L0 = 335,5·10<sup>-1</sup> mm e L = 398·10<sup>-1</sup> mm, sendo P1 = 62,5·10<sup>-1</sup> mm

3º Penetração: L0 = 381·10<sup>-1</sup> mm e L = 32·10<sup>-1</sup> mm, sendo P1 = 51·10<sup>-1</sup> mm

A média das três leituras resultou em 58,17·10<sup>-1</sup> mm. Valor apresentado se encontra entre a penetração 50 e 70, sendo assim o CAP ensaiado está em conformidade com as especificações de serviço.

#### 4.8. Ponto de Amolecimento (Método Anel e Bola)

O ensaio de ponto de amolecimento foi realizado três vezes no CAP sem aditivo, para confirmação dos resultados. As temperaturas resultantes foram de: 48 °C, 51 °C e 49 °C. De

acordo com a tabela de especificação de CAP (Tabela 13), a temperatura mínima para ponto de amolecimento deve ser de 46 °C. O ensaio apresentou temperatura maior que o estabelecido, logo se mostra satisfatório.

**Tabela 13 - Especificação Brasileira de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)**

Características	Unidade	Limites				Métodos	
		CAP 30-45	CAP 50-70	CAP 85-100	CAP 150-200	ABNT	ASTM
Ponto de amolecimento, mín.	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D36

Fonte: Bernucci et. al. (2006)

#### 4.9. Viscosidade Saybolt-Furol

Após a realização do ensaio, os resultados obtidos serviram de base para a construção do gráfico que relaciona temperatura e viscosidade Saybolt Furol (sSF). A temperatura máxima para a realização do ensaio foi de 177 °C. Foram encontrados os seguintes resultados, como mostra a Tabela 14:

**Tabela 14 - Temperatura x segundos Saybolt Furol**

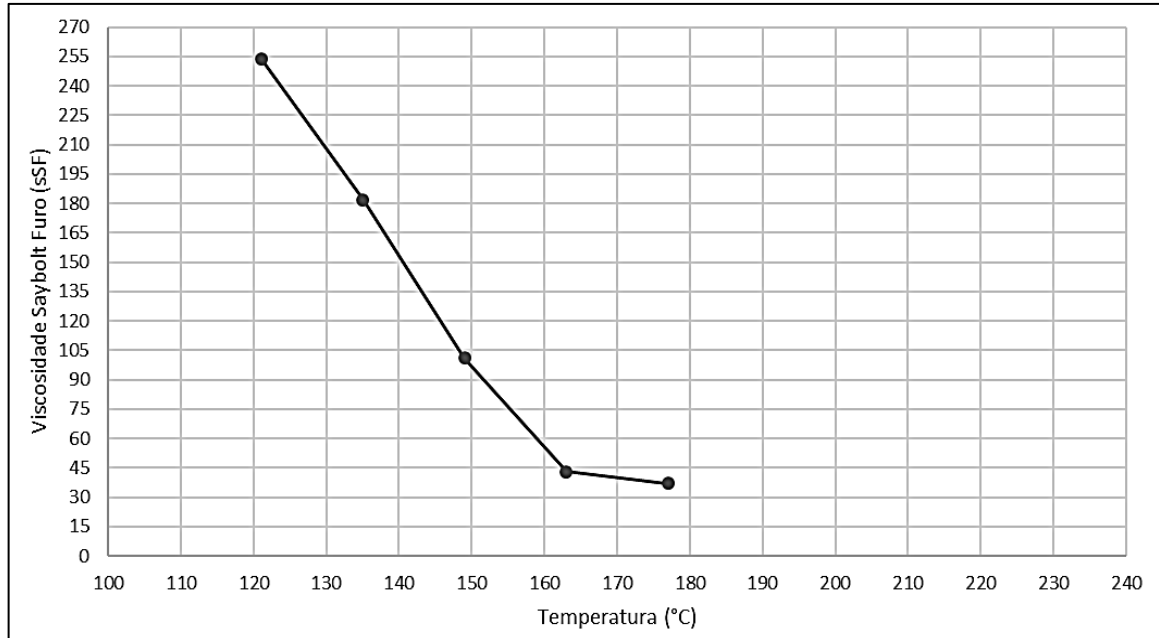
°C	sSF
121	254
135	182
149	101
163	43
177	37

Fonte: Autora (2019)

A norma de especificação de serviços para o Concreto Asfáltico Usinado a Quente determina que a temperatura conveniente para o ligante é aquela na qual o asfalto apresenta uma viscosidade situada dentro da faixa de 75 e 95 segundos “Saybolt-Furol”. A temperatura do ligante obtida através do Gráfico 3, que corresponde a 85±10 sSF, foi na faixa entre 149 °C

e 153 °C. Segundo as especificações, os agregados devem ser aquecidos à temperaturas 10 °C, acima da temperatura do ligante, obtendo-se uma temperatura entre 159 °C e 163 °C.

**Gráfico 3 – Relação Viscosidade x Temperatura – Viscosidade Saybolt-Furol**



Fonte: Autora (2019)

#### 4.10. Determinação da Porcentagem de Betume

A porcentagem de betume é calculada pela seguinte fórmula:

Peso inicial: 450g

Peso final: 427,9 g (após a retirada de betume pelo Rotarex).

$$(\%)betume = \frac{P_{inicial} - P_{final}}{P_{inicial}} * 100$$

$$(\%)betume = \frac{450 - 427,9}{450} * 100$$

$$(\%)betume = 4,92 \% \cong 5,00\%$$

A faixa granulométrica é determinada a partir do peneiramento do material restante (agregados). A norma de especificação de serviço do CAUQ (NBR 031/2006), recomenda faixas granulométricas que variam de A a C. A tabela com resultado do peneiramento se encontra abaixo na Tabela 15.

Tabela 15 - Faixa Granulométrica da mistura

Peso Inicial = 450 g				
Peneiras	Abertura	Acumulado (g)	(%)Passante	FAIXA "C"
2"	50,80	0,00	100	100
1 1/2"	38,10	0,00	100	100
1"	25,40	0,00	100	100
3/4"	19,10	0,00	100	100
1/2"	12,70	5,50	98,8	80-100
3/8"	9,50	81,70	81,84	70-90
n° 4	4,80	235,50	47,67	44-72
n°10	2,00	327,40	27,24	22-50
n° 40	0,42	390,30	13,26	8-26
n° 80	0,18	405,30	9,93	4-16
n° 200	0,08	417,30	7,26	2-10

Fonte: Autora (2019)

#### 4.11. Estabilidade e Fluência Marshall e Parâmetros Volumétricos

A partir das fórmulas dadas têm-se a determinação dos parâmetros de cada corpo de prova. O estudo leva em consideração 3 temperaturas em que os corpos de prova serão submetidos ao realizar o ensaio de Estabilidade e Fluência Marshall. Os corpos de prova ficaram, pelo menos, 30 min expostos às temperaturas.

A norma do DNIT 031/2006 prescreve os limites para cada parâmetro determinado após os ensaios de Estabilidade e de Resistência à Tração. Estes limites classificam a mistura como adequada para utilização e estão especificados no Quadro 2.

**Quadro 2 - Parâmetros para o CAUQ segundo a norma DNER 031/2006**

<b>Características</b>	<b>Método de ensaio</b>	<b>Camada de Rolamento</b>	<b>Camada de Ligação (Blinder)</b>
Porcentagem de vazios, %	DNER-ME 043	3 a 5	4 a 6
Relação Betume/vazios	DNER-ME 043	75 - 82	65 - 72
Estabilidade mínima, (Kgf) (75 golpes)	DNER-ME 043	500	500
Resistência à Tração por Compressão Diametral estática a 25 °C, mínima, MPa	DNER-ME 138	0,65	0,65

Fonte: DNER 031/2006

#### 4.11.1. Resultados para o Ensacado Recém-Fabricado

Os valores obtidos para o ensaio de Estabilidade, Volumetria e Fluência Marshall estão mostrados nas Tabelas 16, Tabela 17 e Tabela 17.

**Tabela 16 – Parâmetros: Traço – Volume (Recém - Fabricado)**

Temperatura	CP	% do CAP	% Brita 0	% do Pó de Brita	Peso Seco	Peso Submerso	Volume
40 °C	1	5,00	38	57	1198,8	514,6	514,60
	2				1194,6	508	508,00
	3				1204,1	510,9	510,90
50 °C	5	5,00	38	57	1194,2	501,4	501,40
	6				1199,7	505,8	505,80
	7				1198,8	503,3	503,30
AMBIENTE	9	5,00	38	57	1199,2	503,1	503,10
	10				1195,1	509,7	509,70
	11				1191,9	503,3	503,30

Fonte: Autora (2019)

**Tabela 17 – Parâmetros: dap, DMT, Vv, VCB, VAM e RBV (Recém - Fabricado)**

Temperatura	CP	Densidade Aparente	Densidade Máxima Teórica	Vv	V.C.B.	V.A.M	R.B.V
40 °C	1	2,33	2,54	8,36	11,31	19,67	57,49
	2	2,35		7,50	11,42	18,91	60,36
	3	2,36		7,29	11,44	18,73	61,08
50 °C	5	2,38	2,54	6,31	11,56	17,87	64,69
	6	2,37		6,70	11,51	18,21	63,22
	7	2,38		6,31	11,56	17,87	64,71
AMBIENTE	9	2,38	2,54	6,24	11,57	17,81	64,97
	10	2,34		7,77	11,38	19,15	59,44
	11	2,37		6,85	11,50	18,34	62,68

Fonte: Autora (2019)

**Tabela 18 – Parâmetros: Fator de correção, Estabilidade e Fluência (Recém - Fabricado)**

Temperatura	CP	Fator de Correção	Estabilidade Encontrada	Estabilidade Corrigida
40 °C	1	0,92	145	133,4
	2	0,89	504	448,56
	3	0,93	597	555,21
50 °C	5	0,82	131	107,42
	6	0,94	ERRO	ERRO
	7	0,98	441	432,18
AMBIENTE	9	0,94	622	584,68
	10	0,95	809	768,55
	11	0,93	564	524,52

Fonte: Autora (2019)

Ao final dos ensaios nos ensacados recém-fabricados, observou-se que alguns corpos de prova não apresentaram resultados bem-sucedidos quando rompidos na prensa Marshall, com valores de estabilidade muito abaixo do esperado. Alguns destes corpos de prova não foram



considerados resultado final quando realizada a média dos parâmetros, demonstrado no Quadro 3.

**Quadro 3 - Resultado - ensacado Recém-Fabricado – Estabilidade de Fluência Marshall**

Temp./Parâmetros	Vv (%)	RBV (%)	Estabilidade (Kgf)
40 °C	7,72	59,64	501,89
50 °C	6,44	64,20	432,18
AMB.	6,95	62,36	625,92

Fonte: Autora (2019)

Comparando com os limites preconizados pela NBR 031/2006, o Volume de Vazios (Vv) foi superior a 5%, a Relação Betume -Vazios também não se enquadrou à norma, com valores abaixo do esperado, já a Estabilidade, para as temperaturas de rompimento de 40 °C e Ambiente, os resultados foram satisfatórios. Para a temperatura de 50 °C a estabilidade não alcançou o mínimo de 500 Kgf. Como explicado, o corpo de prova de CAUQ Estocável quando submetido à 60 °C apresentava deformação e devido à proximidade com a temperatura de ensaio de 50 °C, pode-se concluir que a temperatura influenciou na estabilidade do corpo de prova.

#### 4.11.2. Resultados para Ensacado de 12 meses

Os valores obtidos para o ensaio de Estabilidade, Volumetria e Fluência Marshall no ensacado de 12 meses estão mostrados nas Tabela 19, Tabela 20 e Tabela 21.

**Tabela 19 – Parâmetros: Traço – Volume (12 meses)**

Temperatura	CP	% do CAP	% Brita 0	% do Pó de Brita			Volume
					Peso Seco	Peso Submerso	
40 °C	1	5,00	38	57	1191,7	504,9	504,90
	2				1190,3	489,4	489,40
	3				1193,9	493,3	493,30

(continua)

**Tabela 19 – Parâmetros: Traço – Volume (12 meses)**

(conclusão)

Temperatura	CP	% do CAP	% Brita 0	% do Pó de Brita	Peso Seco	Peso Submerso	Volume
50 °C	5	5,00	38	57	1191,4	491,2	491,20
	6				1190,8	495,4	495,40
	7				1186,1	488,5	488,50
AMBIENTE	9	5,00	38	57	1207,7	506,1	506,10
	10				1162,8	482,9	482,90
	11				1200,4	497,5	497,50

Fonte: Autora (2019)

**Tabela 20 – Parâmetros: dap, DMT, Vv, VCB, VAM e RBV (12 meses)**

Temperatura	CP	Densidade Aparente	Densidade Máxima Teórica	Vazios	V.C.B.	V.A.M	R.B.V
40 °C	1	2,36	2,54	7,16	11,46	18,61	61,56
	2	2,43		4,33	11,81	16,13	73,18
	3	2,42		4,80	11,75	16,55	71,01
50 °C	5	2,43	2,54	4,59	11,77	16,36	71,95
	6	2,40		5,45	11,67	17,12	68,17
	7	2,43		4,49	11,79	16,28	72,41
AMBIENTE	9	2,39	2,54	6,13	11,58	17,72	65,39
	10	2,41		5,28	11,69	16,97	68,88
	11	2,41		5,09	11,71	16,80	69,72

Fonte: Autora (2019)

**Tabela 21 – Parâmetros: Fator de correção, Estabilidade e Fluência (12 meses)**

(continua)

Temperatura	CP	Fator de Correção	Estabilidade Encontrada	Estabilidade Corrigida
40 °C	1	0,76	123,00	93,48

**Tabela 21 – Parâmetros: Fator de correção, Estabilidade e Fluência (12 meses)**  
(conclusão)

Temperatura	CP	Fator de Correção	Estabilidade Encontrada	Estabilidade Corrigida
40 °C	2	0,76	601,00	456,76
	3	0,76	815,00	619,40
50 °C	5	0,76	110,00	83,60
	6	0,76	308,00	234,08
	7	0,76	248,00	188,48
AMBIENTE	9	0,76	654,00	497,04
	10	0,76	602,00	457,52
	11	0,76	755,00	573,80

Fonte: Autora (2019)

Da mesma forma como para o Recém-Fabricado, no ensacado de 12 meses, corpos de prova como o CP01 e CP05 apresentaram estabilidade muito inferior ao esperado, logo não foram considerados nos cálculos de média dos parâmetros. O Quadro 4 apresenta o resumo dos dados obtidos.

**Quadro 4 - Resultado - ensacado de 12 meses – Estabilidade de Fluência Marshall**

Temp./Parâmetros	V <sub>v</sub> (%)	RBV (%)	Estabilidade (Kgf)
40 °C	5,43	68,58	538,08
50 °C	4,84	70,85	211,28
AMB.	5,50	68,00	509,45

Fonte: Autora (2019)

Analisando os resultados finais, o Volume de Vazios (V<sub>v</sub>) foi superior a 5% para os corpos de prova rompidos nas temperaturas de 40 °C e Ambiente, a Relação Betume-Vazios não se enquadrou à norma, com valores abaixo do esperado, já a Estabilidade, para as temperaturas de rompimento de 40 °C e Ambiente, os resultados foram satisfatórios. Para a temperatura de 50 °C a estabilidade não alcançou o mínimo de 500 Kgf.

## 4.11.3. Resultados para o ensacado de 6 meses

Os valores obtidos para o ensaio de Estabilidade, Volumetria e Fluência Marshall estão mostrados nas Tabelas 22, Tabela 23 e Tabela 24.

**Tabela 22 – Parâmetros: Traço – Volume (6meses)**

Temperatura	CP	% do CAP	% Brita 0	% do Pó de Brita	Peso Seco	Peso Submerso	Volume
AMBIENTE	1	5,00	38	57	1179,4	486	486,00
	2				1182,3	487,7	487,70
	3				1174,9	485,1	485,10

Fonte: Autora (2019)

**Tabela 23 – Parâmetros: dap, DMT, Vv, VCB, VAM e RBV (6 meses)**

Temperatura	CP	Densidade Aparente	Densidade Máxima Teórica	Vazios	V.C.B.	V.A.M	R.B.V
AMBIENTE	1	2,43	2,54	4,54	11,78	16,32	72,18
	2	2,42		5,12	11,77	16,41	71,72
	3	2,42		4,73	11,76	16,49	71,32

Fonte: Autora (2019)

**Tabela 24 – Parâmetros: Fator de correção, Estabilidade e Fluência (6 meses)**

Temperatura	CP	Fator de Correção	Estabilidade Encontrada	Estabilidade Corrigida
AMBIENTE	1	0,82	693	568,26
	2	0,94	718	674,92
	3	0,98	722	707,56

Fonte: Autora (2019)

Para o ensacado de 6 meses, o ensaio foi realizado na temperatura ambiente, o resumo dos resultados estão presentes no Quadro 05.

**Quadro 5 - Resultado - ensacado de 6 meses – Estabilidade de Fluência Marshall**

Temp./Parâmetros	V <sub>v</sub> (%)	RBV (%)	Estabilidade (Kgf)
AMBIENTE	4,80	71,74	650,25

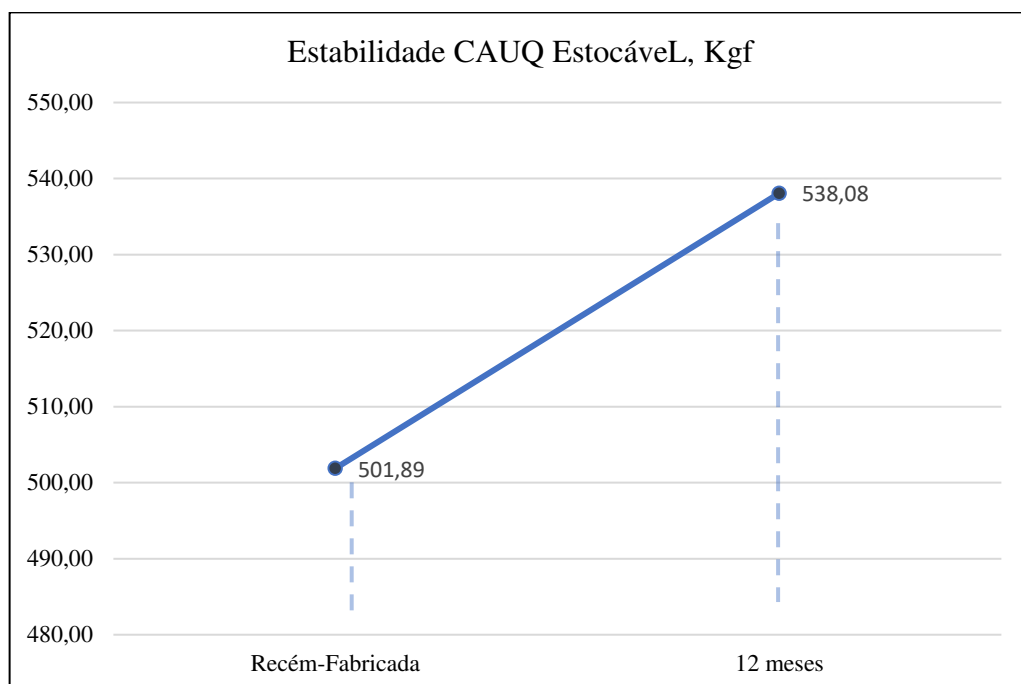
Fonte: Autora (2019)

Levando em consideração as prescrições da NBR 031/2006, de forma geral, os corpos de prova para o ensacado de 6 meses apresentaram Volume de Vazios (V<sub>v</sub>) dentro do especificado, a Relação Betume-Vazios não se enquadrou à norma, com valor abaixo do esperado, e a Estabilidade alcançou o desejado, resultando em 650,25 Kgf, para rompimento na temperatura ambiente.

#### 4.11.4. Representação Gráfica para as Estabilidades encontradas

- Para a temperatura de 40 °C

A estabilidade resultante para as misturas recém-fabricadas e de 12 meses estão representadas no Gráfico 4.

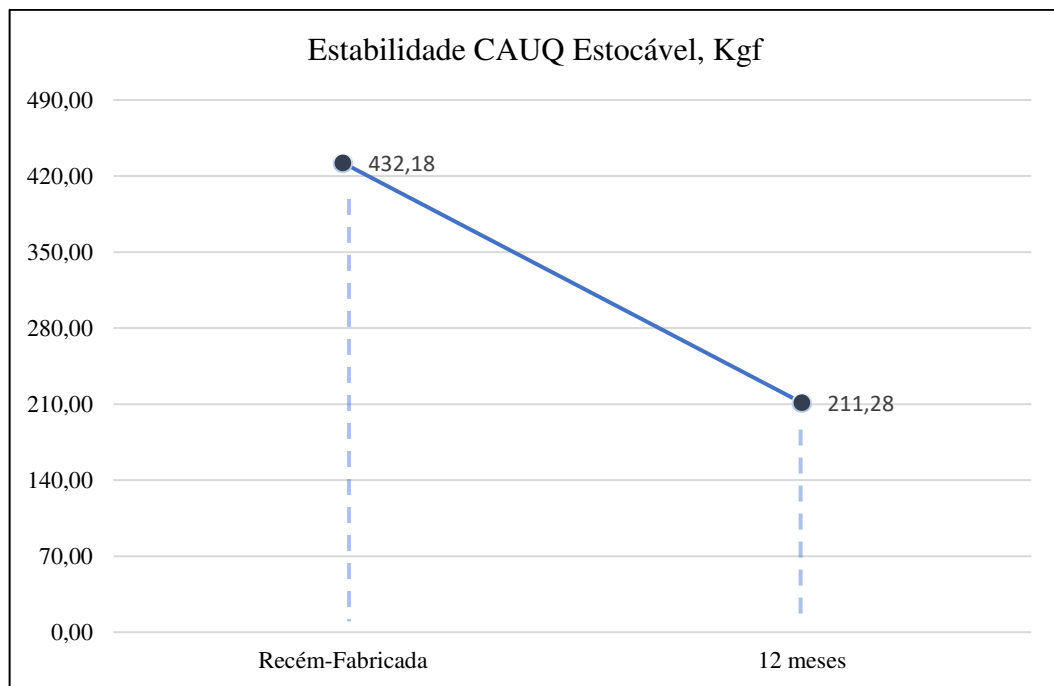
**Gráfico 4 - Estabilidade para Temperatura de 40 °C**

Fonte: Autora (2019)

- Para a temperatura de 50 °C

A estabilidade resultante para as misturas recém-fabricadas e de 12 meses estão representadas no Gráfico 5.

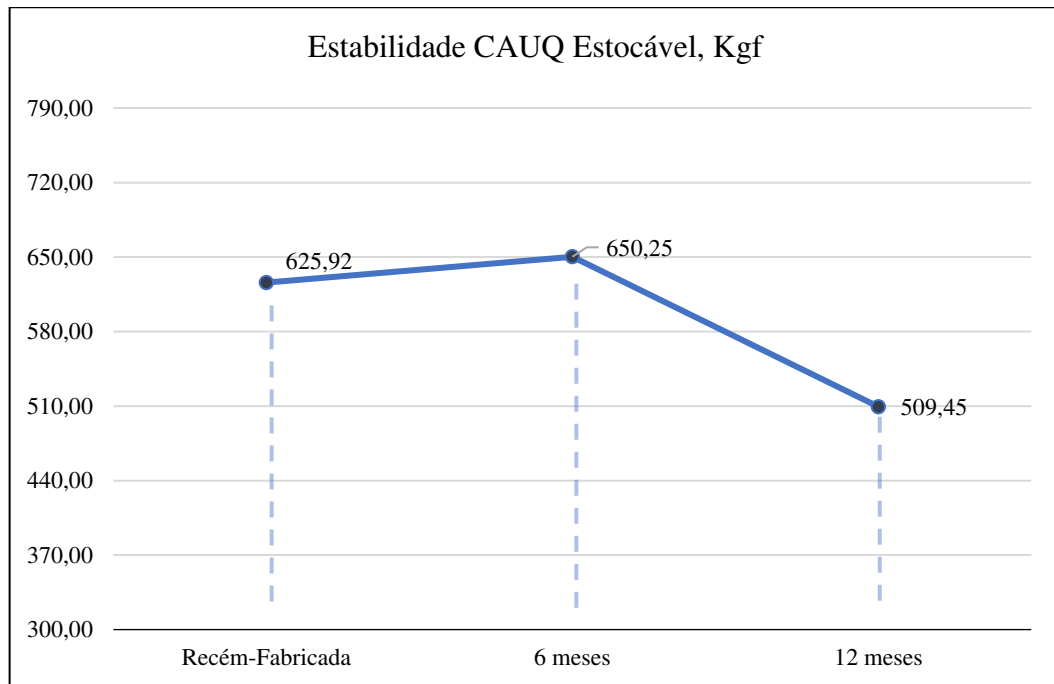
**Gráfico 5 - Estabilidade para Temperatura de 50 °C**



Fonte: Autora (2019)

- Para a temperatura de Ambiente

A estabilidade resultante para as misturas recém-fabricadas, de 6 meses e 12 meses estão representadas no Gráfico 6.

**Gráfico 6 - Estabilidade para Temperatura Ambiente**

Fonte: Autora (2019)

#### 4.12. Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral

De acordo com a norma de especificação de serviço do CAUQ – DNER 031/2006, a resistência à tração por compressão diametral mínima deve ser de 0,65 MPa. O Quadro 6 demonstra os resultados do ensaio. Como observado, a mistura não alcançou a resistência à tração mínima de 0,65 MPa, não atendendo à norma.

**Quadro 6 - Resultados para Resistência à Tração**

(continua)

<b>CAUQ Estocável (6 meses)</b>			
Temperatura	CP	Leitura (N)	RT (MPa)
AMB.	4	1980	0,17
<b>CAUQ Estocável (Recém-Fabricada)</b>			
Temperatura	CP	Leitura (N)	RT (MPa)
40	4	1010	0,09
50	8	1470	0,12
AMB.	12	2220	0,22

**Quadro 6 - Resultados para Resistência à Tração**

(conclusão)

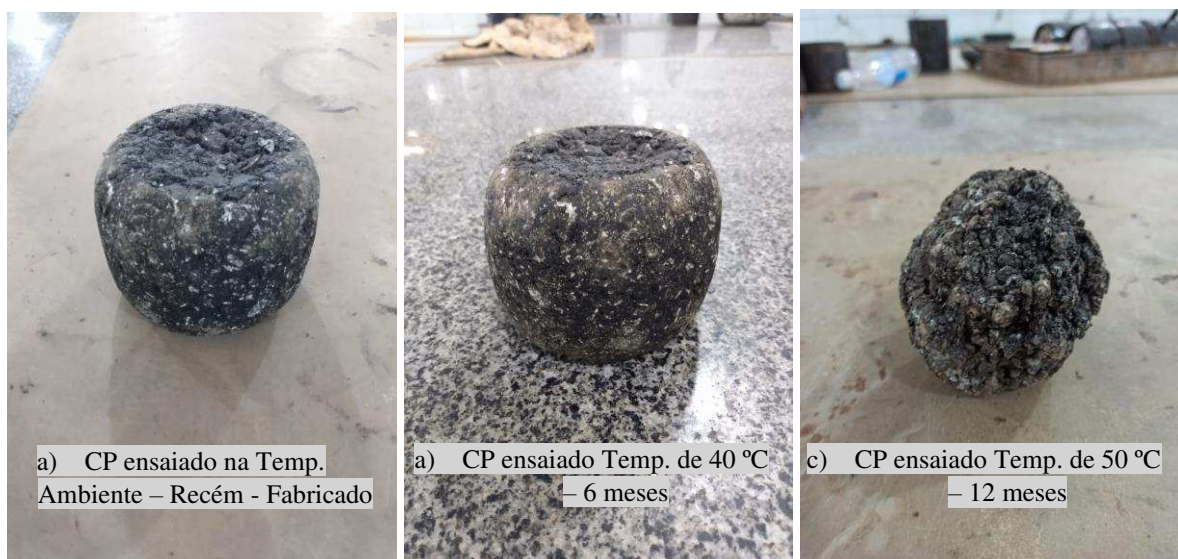
CAUQ Estocável (12 meses)			
Temperatura	CP	Leitura (N)	RT (MPa)
40	4	1350	0,11
50	8	650	0,05
AMB.	12	1040	0,08

Fonte: Autora (2019)

#### 4.13. Ensaio Cântabro

Após o ensaio, os corpos de provas foram pesados para determinar a porcentagem de desgaste. A Figura 34 demonstram o aspecto de alguns corpos de prova pós ensaio.

**Figura 34 - CP's após o ensaio de Desgaste Cântabro**



Fonte: Autora (2019)

Os resultados para o ensaio de Desgaste Cântabro estão presentes no Quadro 7. A norma DNER 383/99 define como desgaste máximo aceito de  $\pm 20\%$ .



**Quadro 7 - Resultados do ensaio de Desgaste Cântabro**

<b>CAUQ Estocável (6 meses)</b>				
Temperatura (°C)	CP	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Desgaste (%)
AMB.	5	1197,60	1125,30	6,04
<b>CAUQ Estocável (Recém-Fabricada)</b>				
Temperatura (°C)	CP	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Desgaste (%)
40	13	1197,10	1184,80	1,03
50	14	1188,40	1182,50	0,50
AMB.	15	1196,50	1173,10	1,96
<b>CAUQ Estocável (12 meses)</b>				
Temperatura (°C)	CP	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Desgaste (%)
40	13	1185,50	735,00	38,00
50	14	1192,30	631,40	47,04
AMB.	15	1195,60	538,50	54,96

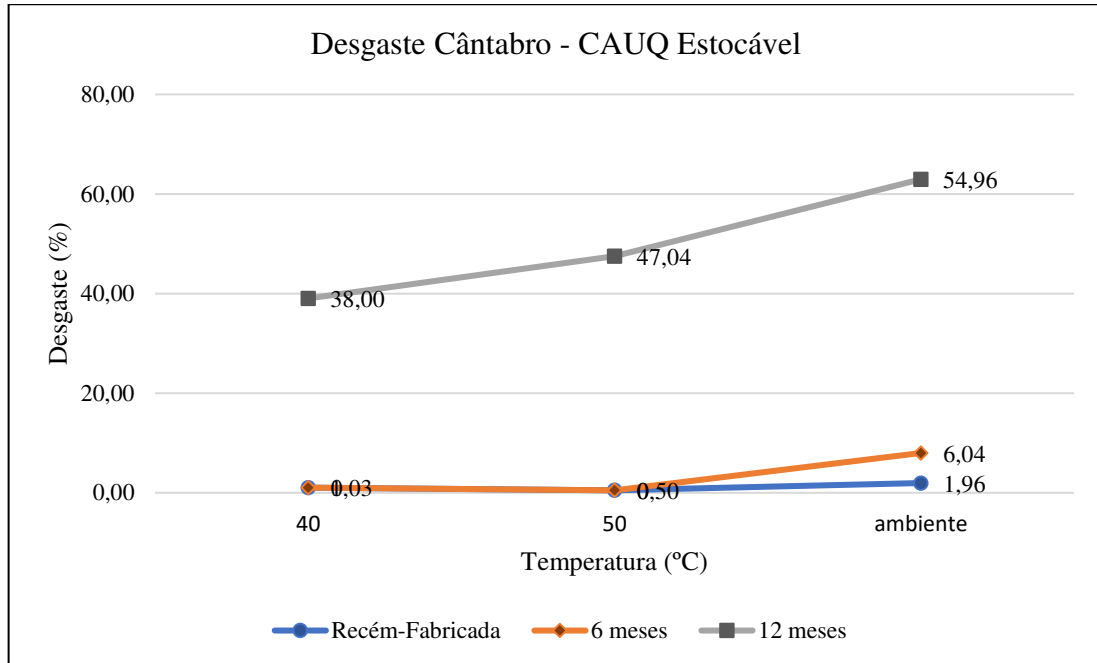
Fonte: Autora (2019)

De acordo com os resultados, os corpos de prova do ensacado de recém-fabricados e de 6 meses apresentaram resultados satisfatórios com desgaste inferior ao limite determinado por norma. Já para o ensacado de 12 meses, a porcentagem de desgaste ultrapassou o limite definido. É possível perceber, também, que a mistura quando ensaiada na temperatura ambiente, apresenta desgaste maior, comparada às outras temperaturas.

- Representação Gráfica dos resultados para o ensaio de Desgaste Cântabro

Os resultados para o ensaio Cântabro estão expressos no Gráfico 7, para que se tenha uma melhor visualização do comportamento da mistura para cada ensacado e temperaturas.

Gráfico 7 - Desgaste Cântabro



Fonte: Autora (2019)

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os ensaios laboratoriais da primeira fase (ensaios físicos) apresentaram resultados satisfatórios, tanto para os agregados como também para o ligante betuminoso, CAP 50/70, tendo por base as normas de especificação de serviços do Concreto asfáltico (DNIT 031/2006). Os agregados (Brita 0 e pó de brita) apresentam uma boa estrutura granulométrica (uniforme e bem graduada) e características físicas favoráveis para a fabricação da mistura asfáltica. Para a mistura de CAUQ, foi constatado que em sua composição é utilizado o CAP com Aditivo, diferente de outras misturas a frio que utilizam a emulsão asfáltica. Foi observado que a função do aditivo é retardar o processo de cura da mistura, para que esta possa ser ensacada e utilizada posteriormente. O processo de fabricação desta mistura segue as prescrições da norma do DNIT 031/2006, com processo de usinagem à quente, diferenciando-se apenas quanto à técnica de estocagem da mistura a frio.

Na segunda etapa do trabalho, foram executados os ensaios mecânicos: Marshall, ensaio Cântabro e ensaio de Resistência a Tração por Compressão Diametral. Foi possível observar, por meio destes ensaios que os corpos de prova não atenderam às especificações da norma do ensaio de Estabilidade e Fluência Marshall, as temperaturas de rompimento foram as de 40 °C, 50 °C e Ambiente. É possível inferir que a mistura não apresenta boa adesividade, após compactação, quando submetidos a altas temperaturas. Os resultados para Volume de vazios (Vv) não atendeu à NBR 031/2006, com valores superiores a 5%. A relação Betume/Vazios (RBV) ficou abaixo do especificado, com valores próximos ao aceitado. A Estabilidade apresentou resultados maiores que 500 Kgf, e a Resistência a Tração resultou em valores abaixo do exigido.

Analisando de forma geral, a medida que chegam ao final da sua validade, os ensacados vão perdendo suas propriedades mecânicas, a mistura aparenta estar mais enrijecida, o que dificulta a compactação. Uma explicação para este processo, pode ser devido ao aditivo estar perdendo a sua capacidade retardar a cura da mistura.

Foi constatado que, conforme aumenta a temperatura, o material vai perdendo suas características de compactação. Outro fator observado, é que, ocorrem dificuldades na compactação a frio da mistura, o corpo de prova, ao final do processo, ultrapassa o molde. Isto pode explicar o não enquadramento do material ao analisar o volume de vazios, ocasionando um resultado maior que o recomendado.

Os resultados divergentes do que é preconizado pela norma do Concreto Asfáltico Usinado a Quente – DNIT 031/2006, pode ser em razão da mistura apresentar características

diferentes do CAUQ convencional, de aplicação a quente, e não possuir, até o momento do trabalho, uma norma de especificação de serviço própria para o CAUQ Estocável de aplicação a frio.

Analisando pela estabilidade e temperatura de aplicação ambiente (como acontece em campo) o CAUQ Estocável apresenta durabilidade até os 12 meses, pois o aditivo conserva as características da mistura, porém a mistura apresenta resultados mais satisfatórios quando recém-fabricada. Em vista dos resultados obtidos, é possível concluir que fatores como a validade do ensacado utilizado no serviço, a temperatura a qual a mistura está exposta e a forma o produto é aplicado em campo, contribuem para que o material após ser compactado, permaneça em bom estado, estes fatores podem ser definitivos para que o pavimento possua durabilidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, Márcio Henrique Furtado. **Revestimentos Flexíveis. 1º Parte – Misturas Asfálticas**. Paraná, 2012.

ARTERIS BRASIL ES – 013 Rev.3. **Execução particular para execução de remendos em pavimentos**. São Paulo, 2015. 7p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR – 6560/2000 – **Determinação do ponto de amolecimento de materiais betuminosos (método do anel e bola)**. Rio de Janeiro, 2000.

BERNUCCI, Liedi Bariani; MOTTA, Laura Maria Goretti da; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; SOARES, Jorge Barbosa. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro, Petrobrás, ABEDA, 2006.

BIAZZI, Adriana Siano Boggio; ANDRADE, Nicelmo de Abreu; VENÂNCIO, José Donizete. **Manual de procedimentos conservação de vias urbanas (tapa buracos)**. São Paulo, 2016. 8p.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de Rodovias – Relatório Gerencial**. Brasília, 2018

DER/PR - DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ. **DER/PR ES-P 12/05 – Pavimentação: Tapa – Buraco**. Paraná, 2005. 7p.

DNER DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 035/98 – Agregados determinação da abrasão “Los Angeles”**. Rio de Janeiro, 1998. 6p.

\_\_\_\_\_. **DNER – ME 054/97 – Equivalente de Areia**. Rio de Janeiro, 2010. 10p.

\_\_\_\_\_. **DNER – ME 194/98 – Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman**. Rio de Janeiro, 1998. 4p.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 083/98 – Agregados - análise granulométrica.** Rio de Janeiro, 1998. 5p.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 084/95 – Agregado miúdo - determinação da densidade real.** Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 081/98 – Agregados - determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo.** Rio de Janeiro, 1998

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 003/99 – Material betuminoso – determinação da penetração.** Rio de Janeiro, 1999.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 247/94 – Material termoplástico para demarcação viária – determinação do ponto de amolecimento (método do anel e bola).** Rio de Janeiro, 1994. 5p.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 004/94 – Material betuminoso – determinação da viscosidade Saybolt-Furol.** Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 043/95 – Misturas betuminosas a quente – Ensaio Marshall.** Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 138/94 – Pavimentos flexíveis – Misturas betuminosas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 383/99 – Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – Ensaio Cantabro.** Rio de Janeiro, 1999.

**DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. Manual de pavimentação – Publicação IPR - 719.** Rio de Janeiro, 2006. 278p.

\_\_\_\_\_. **NORMA 031/2006 – ES. Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço.** Rio de Janeiro, 2004. 13p.

\_\_\_\_\_. **NORMA 032/2005 – ES. Pavimentos flexíveis – Areia-Asfalto a quente – Especificação de serviço.** Rio de Janeiro, 2004. 12p.

GEWHER, Juliano. **CBUQ x PMF.** 2015. Disponível em: <<http://asfaltodequalidade.blogspot.com/2015/>>. Acesso em: 28 de outubro de 2019.

FALCÃO, Paulo Roberto Farias; AGUIAR, Charles Silva de; MEDEIROS, Alexandre Gil Batista. **Avaliação do Efeito Degradante da Água nos Ensaios de Cântabro em uma Mistura de Concreto Asfáltico para Aplicação em Barragem.** Brasília, 2006.

JUNIOR, Armando Morilha. **Caracterização do comportamento mecânico e a fadiga de misturas asfálticas.** Paraná, 2006.

MARANHÃO ASFALTOS. **Apresentação – Único Asfaltos – CBUQ Aditivado.** Maranhão, 2018. 24p.

MOTTA, Rosângela dos Santos. **Estudo de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimentos para redução de emissão de poluentes e de consumo energético.** 2011. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

OLIVEIRA, Alécia Grassuri Barreto de. **Estudos preliminares de mistura asfáltica do tipo CBUQ estocável pra uso em pavimentação no Estado de Goiás.** Goiânia, 2017.

RELATÓRIO DE PESQUISA RDT. **Avaliação laboratorial das propriedades mecânicas de mistura Asfáltica Estocável.** Rio Grande do Sul, 2017. 74p.

SALLES, Cinthya Batista de; SILVA, Renan Diego Amanajás Lima da. **Uma análise sobre o novo conceito de massa asfáltica de concreto betuminoso usinado à quente com armazenamento a frio – CBUQ.** Manaus, 2018. 8p.

SANTANA, A.C.S.T. **Análise das Propriedades Físicas e Mecânicas de Mistura Asfáltica Usinada à Quente Ensacada para Aplicação à Frio.** São Cristóvão: UFS, 2016 (Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia Civil).

SANT'ANA, Walter Canales. **Contribuição ao estudo solo-emulsão em pavimentos de vias de baixo volume de tráfego para o estado do Maranhão/** W. C. Sant'ana.-ed. Rev.- São Paulo, 2009. Tese (doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

SILVA, Rogério Veiga. **O que são Misturas Asfálticas Mornas - Warm Mix Asphalt (WMA).** 2015. Disponível em: < <https://www.linkedin.com/pulse/o-que-s%C3%A3o-misturas-asf%C3%A1lticas-mornas-warm-mix-wma-paulo>>. Acesso em 4 de fevereiro de 2019.

SILVEIRA, Luiz Antônio Xavier da. **Recuperação do pavimento asfáltico urbano.** Paraná, 2017. 19p.

TONIN, Fábio. **Mecânica dos Solos – Revisão: Conceitos de Solos.** São Paulo, 2015. 86p.

VAZ, Vinicius D' Amato. **Você conhece o microrrevestimento asfáltico.** 2014. Disponível em: < <https://www.webartigos.com/artigos/voce-conhece-o-microrrevestimento-asfaltico/125847>>. Acesso em: março de 2019.



**APÊNDICES**

**APÊNDICE A - ENSAIO DE ESTABILIDADE E FLUÊNCIA MARSHALL**

<b>CAUQ Estocável (6 meses)</b>							
<b>CP</b>	<b>H1</b>	<b>H2</b>	<b>H3</b>	<b>Média Altura</b>	<b>Diâmetro</b>	<b>Peso Seco</b>	<b>Peso Submerso</b>
1	72,97	72,51	71,31	72,26	101,26	1179,40	502,70
2	68,70	68,80	67,40	68,30	100,74	1182,30	501,30
3	65,57	68,23	66,19	66,66	101,14	1174,90	499,10
<b>CAUQ Estocável (Recém-Fabricada)</b>							
<b>CP</b>	<b>H1</b>	<b>H2</b>	<b>H3</b>	<b>Média Altura</b>	<b>Diâmetro</b>	<b>Peso Seco</b>	<b>Peso Submerso</b>
1	67,50	66,66	67,06	67,07	100,58	1198,80	514,60
2	65,59	66,04	66,35	65,99	100,38	1194,60	508,00
3	66,04	66,43	66,19	66,22	102,18	1204,10	510,90
5	72,17	71,95	71,43	71,85	101,32	1194,20	501,40
6	65,86	65,94	66,30	66,03	101,21	1199,70	505,80
7	65,06	63,92	64,16	64,38	101,10	1198,80	503,30
9	66,25	66,63	66,24	66,37	101,36	1199,20	503,10
10	65,92	65,47	65,69	65,69	101,01	1195,10	509,70
11	66,45	66,77	67,09	66,77	101,01	1191,90	503,30
<b>CAUQ Estocável (12 meses)</b>							
<b>CP</b>	<b>H1</b>	<b>H2</b>	<b>H3</b>	<b>Média Altura</b>	<b>Diâmetro</b>	<b>Peso Seco</b>	<b>Peso Submerso</b>
1	78,94	79,06	79,21	79,07	101,58	1191,70	504,90
2	78,67	79,27	79,50	79,15	100,83	1190,30	489,40
3	75,78	76,53	76,73	76,35	101,95	1193,90	493,30
5	77,12	78,45	77,53	77,70	101,46	1191,40	491,20
6	78,37	78,39	77,55	78,10	103,82	1190,80	495,40
7	79,63	79,12	79,65	79,47	101,38	1186,10	488,50
9	77,39	76,66	79,04	77,70	101,54	1207,70	506,10
10	78,73	79,27	78,67	78,89	101,28	1162,80	482,90
11	78,50	78,86	78,55	78,64	100,59	1200,40	497,50

Fonte: Autora (2019)

**APÊNDICE B - ENSAIO DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL**

<b>CAUQ Estocável (6 meses)</b>						
Temperatura	CP	H1	H2	H3	<b>Média Altura</b>	<b>Diâmetro</b>
Ambiente	4	74,05	73,95	74,83	74,28	100,70
<b>CAUQ Estocável (Recém-Fabricada)</b>						
Temperatura	CP	H1	H2	H3	<b>Média Altura</b>	<b>Diâmetro</b>
40 °C	4	69,23	69,37	68,88	69,16	101,44
50 °C	8	69,49	69,32	69,54	69,45	109,09
Ambiente	12	63,68	63,89	63,72	63,76	102,20
<b>CAUQ Estocável (12 meses)</b>						
Temperatura	CP	H1	H2	H3	<b>Média Altura</b>	<b>Diâmetro</b>
40 °C	4	78,40	77,87	77,79	78,02	100,86
50 °C	8	78,45	79,16	79,48	79,03	102,21
Ambiente	12	78,50	78,98	78,21	78,56	101,70

Fonte: Autora (2019)

**APÊNDICE C - PESO INICIAL - CP'S PARA ENSAIO CANTABRO**

<b>CAUQ Estocável (6 meses)</b>	
CP	Peso Inicial
5	1197,6
<b>CAUQ Estocável (Recém-Fabricada)</b>	
CP	Peso Inicial
13	1197,1
14	1188,4
15	1196,5
<b>CAUQ Estocável (12 meses)</b>	
CP	Peso Inicial
13	1185,50
14	1192,30
15	1195,60

Fonte: Autora (2019)

**ANEXO A - ESPESSURA DO CORPO-DE-PROVA.**

<b>ESPESSURA (mm)</b>	<b>FATOR</b>	<b>ESPESSURA (mm)</b>	<b>FATOR</b>	<b>ESPESSURA (mm)</b>	<b>FATOR</b>
50,80	1,47	56,30	1,22	64,30	0,98
21,00	1,45	56,30	1,21	64,70	0,97
51,20	1,44	56,80	1,20	65,10	0,96
51,60	1,43	57,12	1,19	65,60	0,95
51,80	1,42	57,40	1,18	66,10	0,94
52,00	1,41	57,70	1,17	66,70	0,93
52,20	1,40	58,10	1,16	67,10	0,92
52,40	1,39	58,40	1,15	67,50	0,91
52,60	1,38	58,70	1,14	67,90	0,90
52,90	1,37	59,00	1,13	68,30	0,89
53,10	1,36	59,30	1,12	68,80	0,88
53,30	1,35	59,70	1,11	69,30	0,87
53,50	1,34	60,00	1,10	69,90	0,86
53,80	1,33	60,30	1,09	70,30	0,85
54,00	1,32	60,60	1,08	70,80	0,84
54,20	1,31	60,90	1,07	71,40	0,83
54,50	1,30	61,10	1,06	72,20	0,82
54,70	1,29	61,40	1,05	73,00	0,81
54,90	1,28	61,90	1,04	73,50	0,80
55,10	1,27	62,30	1,03	74,00	0,79
55,40	1,26	62,70	1,02	74,60	0,78
55,60	1,25	63,10	1,01	75,40	0,77
55,80	1,24	63,50	1,00	76,20	0,76
56,10	1,23	63,90	0,99		

Fonte: DNER 043/95