

CENTRO UNIVERSITARIO DE FORMIGA – UNIFOR MG
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL
BRUNO SOUZA ALVARENGA

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO CBUQ COM AGREGADOS E
CIMENTOS ASFÁLTICOS DIFERENTES

FORMIGA-MG
2018

BRUNO SOUZA ALVARENGA

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO CBUQ COM AGREGADOS E CIMENTOS
ASFÁLTICOS DIFERENTES

Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao Curso de Engenharia Civil do UNIFOR-
MG como requisito para obtenção do
título de bacharel em Engenharia Civil.
Orientador: Prof. Dr. Paulo José Silva

FORMIGA – MG

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca UNIFOR-MG

A473 Alvarenga, Bruno Souza.

Análise do comportamento do CBUQ com agregados e cimentos
asfálticos diferentes / Bruno Souza Alvarenga.– 2018.

65 f.

Orientador: Paulo José Silva.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) –
Centro Universitário de Formiga - UNIFOR, Formiga, 2018.

1. Asfalto. 2. Agregados diferentes. 3. Cimentos asfálticos diferentes.
I. Título.

CDD 625.8

Catalogação elaborada na fonte pela bibliotecária
Regina Célia Reis Ribeiro – CRB 6-1362

BRUNO SOUZA ALVARENGA

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO CBUQ COM AGREGADOS E CIMENTOS
ASFÁLTICOS DIFERENTES

Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao Curso de Engenharia Civil do UNIFOR-
MG como requisito para obtenção do
título de bacharel em Engenharia Civil.
Orientador: Prof. Dr. Paulo José Silva

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Paulo José Silva
Orientador



Prof. Dr. Ronan Souza Salles
UNIFOR



Karla Cristine Macedo Corrêa
Engenheira Civil

Formiga, 13 de novembro de 2018

RESUMO

Com a crescente evolução do setor de estradas no Brasil, visto que a demanda por transporte de pessoas e mercadorias, e a expansão das ruas e avenidas das cidades, são cada vez maiores, a procura por pavimento flexível de melhor qualidade e durabilidade só tende a aumentar também. Diante desta situação e da disponibilidade de agregados graúdos e miúdos de origem calcária e gnáissica na região de Campo Belo, em Minas Gerais, foi proposta a análise do comportamento do concreto betuminoso usinado a quente com agregados e cimentos asfálticos diferentes, variando entre traços de pó gnáissico e brita calcária e pó calcário e brita gnáissica, ambos com cimento asfáltico de petróleo 50/70, que é convencional, e 60/85 que possui adição de polímeros SBS (estireno-butadieno-estireno), formando assim quatro traços distintos, que foram comparados entre si nos principais parâmetros como vazios cheios de betume, estabilidade e fluência, obtendo resultados que diferenciaram os melhores traços. No comparativo entre CAPs, os traços de pó gnáissico e brita calcária com CAP 60/85 foram superiores em 0,86% e 23,60% nos parâmetros de vazios cheios de betume e estabilidade, em relação aos mesmos traços com CAP 50/70, sendo que estes foram superiores em 7,91% no parâmetro fluência, em relação aos mesmos traços com CAP 60/85. Os traços de pó calcário e brita gnáissica com CAP 60/85 foram superiores em 33,76% e 10,97% nos parâmetros estabilidade e fluência, em relação aos mesmos traços com CAP 50/70, sendo que estes foram superiores em 0,17% no parâmetro vazios cheios de betume, em relação aos mesmos traços com CAP 60/85. No comparativo entre agregados, os traços de CAP 60/85 com pó gnáissico e brita calcária foram superiores em 1,13% e 6,57% nos parâmetros de vazios cheios de betume e estabilidade, em relação aos mesmos traços com pó calcário e brita gnáissica, sendo que estes foram superiores em 25,79% no parâmetro fluência, em relação aos mesmos traços com pó gnáissico e brita calcária. Os traços de CAP 50/70 com pó gnáissico e brita calcária foram superiores em 0,086% e 15,33% nos parâmetros vazios cheios de betume e estabilidade, em relação aos mesmos traços com pó calcário e brita gnáissica, sendo que estes foram superiores em 5,03% no parâmetro fluência em relação aos mesmos traços com pó gnáissico e brita calcária.

Palavras chave: Asfalto. Agregados diferentes. Cimentos asfálticos diferentes

ABSTRACT

With the increasing evolution of the road sector in Brazil, as the demand for transportation of people and goods, and the expansion of the streets and avenues of the cities, are increasing, the demand for flexible pavement of better quality and durability only tends to increase as well. In view of this situation and the availability of large and small aggregates of calcareous and gneissic origin in the Campo Belo region of Minas Gerais, it was proposed the analysis of the behavior of hot bituminous concrete with different aggregates and asphaltic cements varying between powder traços gneiss and limestone and limestone and gneiss rock, both with 50/70 petroleum asphalt cement, which is conventional, and 60/85 which has addition of SBS (styrene-butadiene-styrene) polymers, thus forming four distinct traces which were compared to each other in the main parameters such as voids filled with bitumen, stability and fluency, obtaining results that differentiated the best traces. In the comparison between CAPs, the traces of gneissic dust and limestone with CAP 60/85 were superior in 0.86% and 23.60% in the parameters of voids filled with bitumen and stability, in relation to the same traces with CAP 50/70, which were higher in 7.91% in the fluency parameter, in relation to the same traits with CAP 60/85. The traces of limestone and gneiss grains with CAP 60/85 were superior in 33.76% and 10.97% in stability and flowability parameters, in relation to the same traces with CAP 50/70, which were higher in 0, 17% in the parameter empty filled with bitumen, in relation to the same traces with CAP 60/85. In the comparison between aggregates, the traces of CAP 60/85 with gneissic dust and limestone were superior in 1.13% and 6.57% in the parameters of voids filled with bitumen and stability, in relation to the same traces with limestone powder and gravel gnáicas, being that these were superior in 25,79% in the parameter fluency, in relation to the same traces with gnáísico powder and limestone. The traces of CAP 50/70 with gneiss powder and limestone were superior in 0.086% and 15.33% in the empty parameters filled with bitumen and stability, in relation to the same traces with limestone powder and gneiss, and these were superior in 5.03% in the creep parameter in relation to the same traces with gneissic powder and limestone.

Keywords: Asphalt. Different aggregates. Different asphaltic cements

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - As camadas do pavimento asfáltico	17
Figura 2 - Esquema de produção de asfalto em um estágio	20
Figura 3 - Agregado graúdo calcário	32
Figura 4 - Agregado miúdo calcário	32
Figura 5 - Agregado graúdo gnáissico	33
Figura 6 - Agregado miúdo gnáissico	33
Figura 7 - Agitador mecânico de peneiras	35
Figura 8 - Estufa elétrica.....	37
Figura 9 - Molde para compactação	38
Figura 10 - Aparelho banho maria	42
Figura 11 - Prensa Marshall.....	43

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva granulométrica dos agregados graúdos e miúdos utilizados no ensaio	44
Gráfico 2 - Média dos resultados de vazios cheios de betume obtidos por meio de cálculos comparando CAP	51
Gráfico 3 - Média dos resultados de estabilidade obtidos no ensaio Marshall comparando CAP.....	53
Gráfico 4 - Média dos resultados de fluência obtidos no ensaio Marshall comparando CAP	55
Gráfico 5 - Média dos resultados de vazios cheios de betume obtidos por meio de cálculos comparando agregados	57
Gráfico 6 - Média dos resultados de estabilidade obtidos no ensaio Marshall comparando agregados	59
Gráfico 7 - Média dos resultados de fluência obtidos no ensaio Marshall comparando agregados	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP) - Classificação por penetração	22
Tabela 2 - Características do cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero elastomérico.....	25
Tabela 3 - Faixas granulométricas e requisitos para concreto asfáltico.....	29
Tabela 4 - Características mínimas para execução de CBUQ.....	30
Tabela 5 - Granulometria utilizada.....	45
Tabela 6 - Resultados obtidos - Pó gnáissico e brita calcária com CAP 60/85.	46
Tabela 7 - Resultados obtidos - Pó gnáissico e brita calcária com CAP 50/70.	47
Tabela 8 - Resultados obtidos - Pó calcário e brita gnáissica com CAP 60/85.	48
Tabela 9 - Resultados obtidos - Pó calcário e brita gnáissica com CAP 50/70.	49
Tabela 10 - Média dos resultados de vazios cheios de betume obtidos por meio de cálculos comparando CAP	50
Tabela 11 - Média dos resultados de estabilidade obtidos no ensaio Marshall comparando CAP.....	52
Tabela 12 - Média dos resultados de fluência obtidos no ensaio Marshall comparando CAP	54
Tabela 13 - Média dos resultados de vazios de betume obtidos por meio de cálculos comparando agregados	56
Tabela 14 - Média dos resultados da estabilidade obtidos no ensaio Marshall comparando agregados	58
Tabela 15 - Média dos resultados da fluência obtidos no ensaio Marshall comparando agregados	60

LISTA DE ABREVIATURAS

API	American Petroleum Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAP	Cimento asfáltico de petróleo
CBUQ	Concreto betuminoso usinado a quente
cm	Centímetro
cm ³	Centímetro cúbico
CS ₂	Dissulfeto de Carbono
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EM	Especificação de Material
ES	Especificação de Serviço
g	Gramma
kg	Quilograma
kgf	Quilograma-força
Kn	Quilo Newton
ME	Método de Ensaio
ml	Mililitro
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
N	Newton
°C	Grau Celsius
PRO	Procedimento
SBR	Estireno-Butadieno-Rubber
SBS	Estireno-Butadieno-Estireno
V	Volume
ρ	Densidade

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 JUSTIFICATIVA	15
3 OBJETIVOS	16
3.1 OBJETIVO GERAL	16
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
4.1 PAVIMENTAÇÃO	17
4.1.1 CAMADAS DO PAVIMENTO	17
4.2 ASFALTO	19
4.2.1 VARIAÇÕES DO ASFALTO	20
4.3 CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO (CAP)	21
4.4 CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO (CAP) POLIMÉRICO	23
4.5 AGREGADOS	25
4.5.2 GNAISSE	26
4.6 GRANULOMETRIA DE AGREGADOS	26
4.6.1 AGREGADOS MIÚDOS	27
4.6.2 AGREGADOS GRAÚDOS	27
4.6.3 FÍLER	27
4.7 CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE (CBUQ)	27
4.8 FABRICAÇÃO DO CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE (CBUQ)	28
4.9 FAIXAS GRANULOMÉTRICAS	29
5 MATERIAIS E MÉTODOS	31
5.1 PROCEDIMENTOS EM LABORATÓRIO	31
5.1.1 AGREGADOS	31
5.1.2 ENSAIO GRANULOMÉTRICO	34

5.1.3 ENSAIO MARSHALL	35
6.1 GRANULOMETRIA.....	44
6.2 ENSAIO MARSHALL	45
6.3 COMPARATIVO ENTRE CAP 60/85 E CAP 50/70	50
6.3.1 VAZIOS CHEIOS DE BETUME	50
6.3.2 ESTABILIDADE	52
6.3.3 FLUÊNCIA	53
6.4 COMPARATIVO ENTRE AGREGADOS PÓ GNÁISSICO/BRITA CALCÁRIA E PÓ CALCÁRIO/BRITA GNÁISSICA	56
6.4.1 VAZIOS CHEIOS DE BETUME	56
6.4.2 ESTABILIDADE	57
6.4.3 FLUÊNCIA	59
7 CONCLUSÃO.....	62

1 INTRODUÇÃO

Segundo Balbo (2007), as estradas foram criadas pelo homem, cuja lembrança mais remota vem da China, com o objetivo de conseguir acesso a fontes de matérias primas, procurando sempre ampliar o seu território e suas áreas de influência. Mais tarde os romanos aperfeiçoaram as estradas, instalando pavimentos e drenagens, procurando sempre torná-las mais duradouras, visto que já eram necessárias para o desenvolvimento, sua degradação era perceptível e sua manutenção era necessária.

No Brasil, de acordo com o DNIT, a primeira estrada foi construída no século XVIII, sob supervisão de engenheiros da Escola de Fortificações de Lisboa na capitania de São Paulo sobre influência do governador Bernardo José de Lorena, que como seu criador a nomeou de Calçada de Lorena. Tal estrada interligava o Planalto Paulista ao Porto de Santos.

Um pavimento tem como função suportar os esforços provenientes da ação dos veículos sobre si mesmo, assim, melhorando o tráfego de veículos através de uma superfície regular, que garante conforto, de uma superfície aderente, que garante segurança em condições úmidas, e de uma superfície menos ruidosa, diante da ação dinâmica dos pneumáticos, proporcionando um deslocamento de tráfego confortável, seguro e ágil, de acordo com Balbo (2007).

De acordo com a Confederação Nacional dos Transportes (CNT) que é responsável por pesquisas dentro da área, o Brasil é um país onde o principal meio de transporte é o terrestre, sendo assim, este possui uma grande malha rodoviária. Em 2017 foi feita uma pesquisa pela CNT onde foram percorridos 105.814 quilômetros de rodovias, abrangendo ao mesmo tempo, rodovias federais e estaduais, sendo que, 51,1% (54.142 quilômetros) apresentaram pavimento desgastado, 23,9% (25.285 quilômetros) apresentaram trinca em malha ou remendos, 2,3% (2.396 quilômetros) apresentaram afundamentos, ondulações e buracos, 1,1% (1.136 quilômetros) apresentaram pavimento totalmente destruído, e apenas 21,6% (22.855 quilômetros) apresentaram pavimento totalmente perfeito.

O principal vilão do desgaste das rodovias brasileiras segundo a CNT, são os veículos de carga pesada, aliados com rodovias más projetadas ao fluxo real de veículos e até mesmo más executadas por empresas que não recebem a devida fiscalização do governo

Ao mesmo tempo que outras áreas da Engenharia Civil crescem, a área de estradas cresce também, com grandes avanços tecnológicos no setor de pavimentação asfáltica, buscando sempre o melhor custo benefício. O setor de usinas de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) implantou sistemas de dosagem eletrônica automática de agregados graúdos e miúdos e do principal componente do CBUQ, o cimento asfáltico de petróleo (CAP), que representa mais de 50% do valor da massa, assim utilizando somente o necessário para a obtenção da resistência pretendida, de acordo com Balbo (2007).

Este trabalho tem como objetivo avaliar a utilização de agregados de rochas diferentes, calcária e gnáissica, provenientes de pedreiras localizadas na cidade de Campo Belo MG, com dois tipos de CAP diferentes, na tentativa de obter-se melhores índices de resistência do CBUQ

2 JUSTIFICATIVA

O Brasil é um país dependente do transporte rodoviário, e possui uma extensa malha rodoviária, sendo esta utilizada para o transporte de pessoas, mercadorias dentre outros, e necessitando cada vez mais de expansão de sua área de cobertura, melhoria e manutenção das vias já existentes.

O transporte de cargas é realizado por caminhões e carretas, que possuem múltiplos eixos que demandam a quantidade de carga legalmente permitida para cada veículo, que na maioria das vezes não é respeitada e é excedida, visto que a fiscalização por meio de balanças no Brasil ainda é muito pequena se comparada com a quantidade de rodovias existentes, o que gera um desgaste prematuro das vias asfálticas e a procura constante por elementos que fazem com que o CBUQ se torne cada vez mais resistente.

Campo Belo MG está localizada em uma área que possui duas pedreiras locais, uma com rocha calcária e outra com rocha gnáissica, possibilitando a comparação dos agregados provenientes destas duas rochas juntos em um mesmo traço de CBUQ, combinados a diferentes cimentos asfálticos de petróleo (CAP), assim obtendo resultados para possíveis utilizações.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Combinar diferentes tipos de agregados com diferentes tipos de cimento asfáltico de petróleo (CAP) na composição do concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) e analisar os resultados obtidos no Ensaio de Marshall.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Combinar agregado graúdo de origem calcária com agregado miúdo de origem gnáissica com a utilização de CAP 50/70 e executar o ensaio de Marshall.
2. Combinar agregado graúdo de origem gnáissica com agregado miúdo de origem calcária com a utilização de CAP 50/70 e executar o ensaio de Marshall.
3. Combinar agregado graúdo de origem calcária com agregado miúdo de origem gnáissica com a utilização de CAP 60/85 e executar o ensaio de Marshall.
4. Combinar agregado graúdo de origem gnáissica com agregado miúdo de origem calcária com a utilização de CAP 60/85 e executar o ensaio de Marshall.
5. Comparar os resultados obtidos nos ensaios de Marshall.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

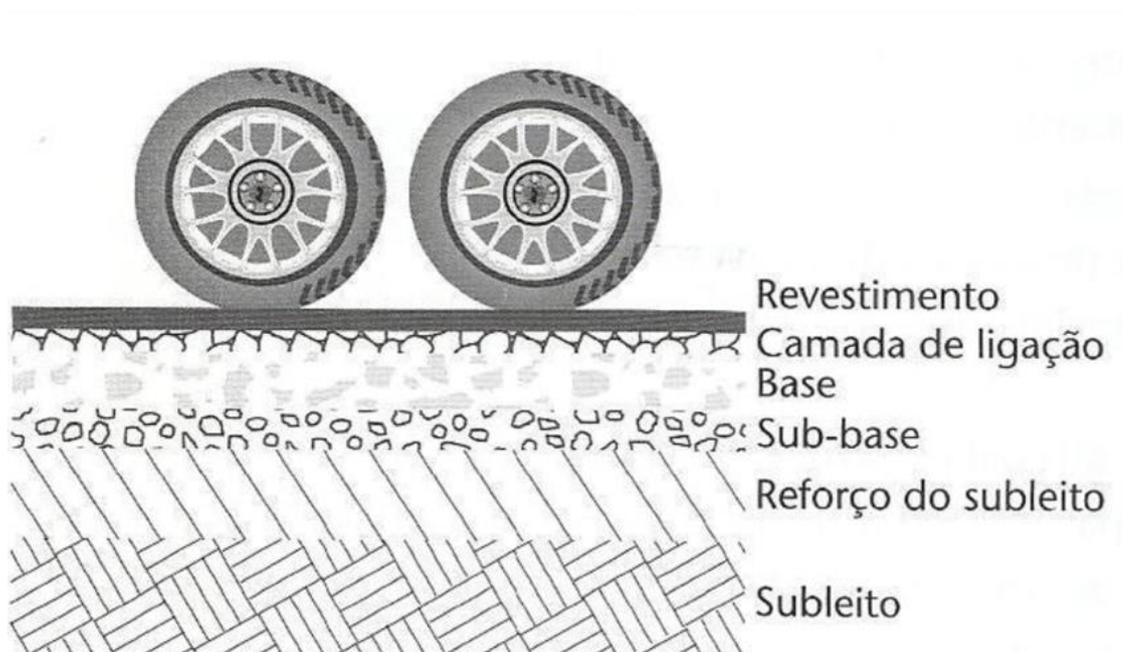
4.1 PAVIMENTAÇÃO

Segundo Senço (2007) o pavimento ou a pavimentação é construída sobre a terraplanagem, tendo sua estrutura constituída por camadas segundo projetos, que possuem a função de suportar esforços verticais provenientes do tráfego e horizontais provenientes de desgastes, assim melhorando as condições de rodagem, dando aos ocupantes de veículos, mais conforto e segurança.

4.1.1 CAMADAS DO PAVIMENTO

De acordo com Balbo (2007) as camadas do pavimento por ordem de execução dos serviços (FIG. 1):

Figura 1 - As camadas do pavimento asfáltico



Fonte: Pavimentação Asfáltica materiais, projeto e restauração, 2007, p. 36

- O subleito, segundo Balbo (2007), é a camada composta de material natural já existente e compactado como cortes por exemplo, ou por material transportado e compactado como é o caso de aterros.
- Os reforços de subleitos ocorrem quando as camadas do subleito apresentam materiais de baixa resistência aos esforços verticais, ou de cisalhamento, assim são adicionados solos de melhor qualidade a ele, aumentando sua resistência aos esforços oriundos das camadas que serão colocadas acima dele, e posteriormente os esforços provenientes dos veículos em tráfego no pavimento. Vale lembrar que esta camada não é obrigatória, pois as camadas posteriores ao subleito se executadas com espessuras maiores, podem aliviar as pressões em um subleito de solo ruim.
- As bases e sub-bases são as camadas executadas para reduzir as pressões exercidas sobre as camadas anteriores, assim necessitando serem de uma resistência maior que as outras, pois irão receber solicitações de esforços superiores. Nas bases e sub-bases podem ser utilizados os mesmos materiais, sendo constituídas de solo estabilizado naturalmente, mistura de solo e agregados (solo-brita), brita graduada, brita graduada tratada com cimento, solo estabilizado com ligante hidráulico ou asfalto, concreto, ou de qualquer material que possa desempenhar-se igual ou melhor.
- A imprimação impermeabilizante é executada com asfalto diluído, com a função de impermeabilizar as camadas de solo antes da execução de uma nova camada superior e a pintura de ligação que possui composição básica de emulsão asfáltica possui a função de aderir, ou juntar, uma camada (base ou sub-base) a outra (revestimento).
- O revestimento é a última camada do pavimento, e conseqüentemente a que irá receber os esforços provenientes de cargas estáticas ou dinâmicas provenientes do tráfego de veículos procurando sempre não sofrer danos como deformações (elástica ou plástica), perda de compactação ou desagregação de componentes. O revestimento para evitar a movimentação horizontal e sempre composto de materiais muito bem aglutinados, e podem ser subdivididos em camada de rolamento, que é a camada superficial e que tem contato direto com o tráfego de veículos; camada de ligação, ou camada intermediária, que fica entre a base do pavimento e a camada de rolamento;

camada de nivelamento, ou seja, a camada regularizadora aplicada na execução de obras de reforços (recapeamentos) antes da camada de reforço; camada de reforço, é a camada aplicada após anos de uso do pavimento que já existe na área (recape), com a função de reforçar o revestimento. Segundo Bernucci (2006) o revestimento possui amplas possibilidades de variação. O CBUQ (Concreto betuminoso usinado a quente) é o mais utilizado, sendo fabricado com a utilização de CAP (Cimento asfáltico de petróleo) e agregados aquecidos a altas temperaturas, porém existe o PMF (Pré misturado a frio), que utiliza em sua composição emulsões asfálticas de petróleo e agregados à temperatura ambiente, podendo ser utilizado em revestimentos de ruas e avenidas ou até mesmo em operações de conservação de rodovias, e tem como contrapartida um custo mais acessível.

4.2 ASFALTO

De acordo com Senço (2007, p. 320) “Asfaltos são materiais aglutinantes de consistência variável, cor pardo-escuro ou negra e nos quais o constituinte predominante é o betume, podendo ocorrer na natureza em jazidas ou ser obtido pela refinação do petróleo.”

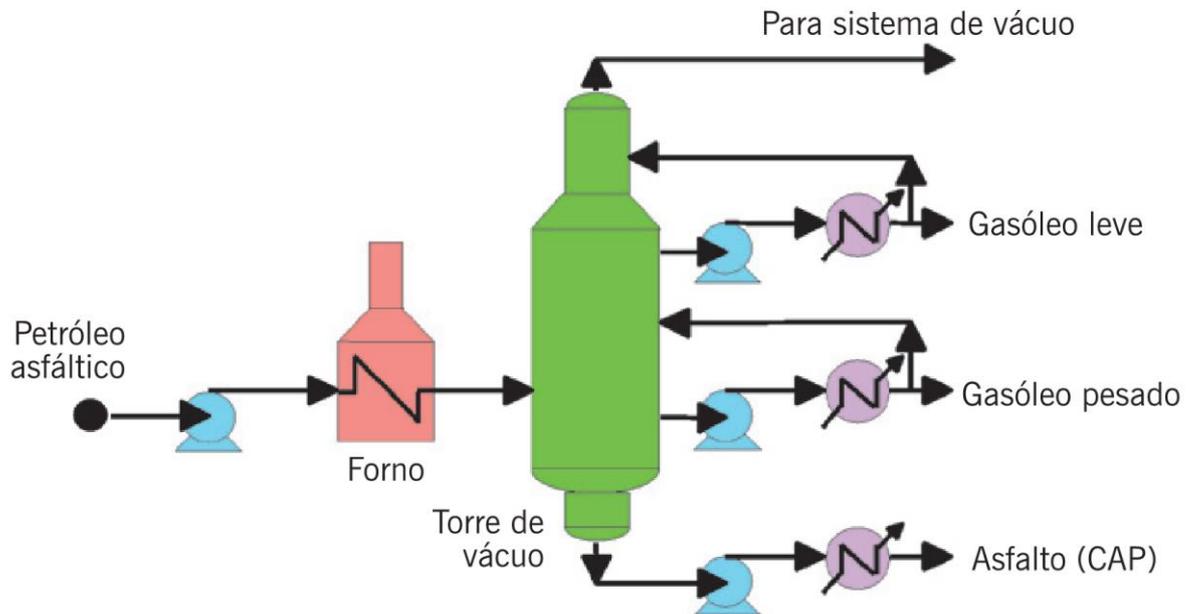
O asfalto possui grande diversidade de utilizações tanto no ramo da engenharia civil quanto fora dela, podendo ser utilizado desde a impermeabilização ou assentamento de tijolos como na antiga Mesopotâmia, ou até mesmo na mumificação no antigo Egito. (SENÇO, 2007).

No Brasil o asfalto começou a ser produzido em 1944, com petróleo de origem venezuelana na refinaria Ipiranga, que tinha como principal aplicação a pavimentação de vias e estradas, antes desse marco, o então asfalto era importado de Trinidad, que possuía lagos de asfalto naturais e chegava pronto aqui em tambores de 200 litros. (SENÇO, 2007).

O refino de petróleo (FIG. 2) ocorre por destilação, onde as suas frações mais leves como gasolina, querosene ou até mesmo óleo diesel, são separadas fracionamento, vaporização ou condensação. A concentração do asfalto pode variar dependendo de seu maior fator, o grau de API, ficando entre 10% e 80% do volume total, assim o grau de API é diretamente proporcional a densidade relativa

e inversamente proporcional ao teor de asfalto do petróleo extraído da jazida. (MANUAL BÁSICO DE EMULÇÕES ASFÁLTICAS, 2010).

Figura 2 - Esquema de produção de asfalto em um estágio



Fonte: Pavimentação asfáltica, formação básica para engenheiros, 2008, p. 35

Dentro do mundo atual, com tamanho crescimento do setor de transportes, e com necessidade cada vez maior do crescimento da malha rodoviária de quase todos os países, o asfalto é o recurso mais utilizado na pavimentação, pois consegue aliar união de agregados sem perda de flexibilidade, a uma alta durabilidade resistente à maioria dos ácidos, álcalis e sais, além de proporcionar uma vida útil maior das camadas inferiores devido à sua forte qualidade de impermeabilização. (BERNUCCI, 2006).

4.2.1 VARIAÇÕES DO ASFALTO

De acordo com Senço (2007) os asfaltos podem ser diferenciados quanto a sua natureza em três diferentes tipos:

- Rochas asfálticas ou arenito betuminoso: Essas rochas possuem certa flexibilidade e impermeabilidade devidos aos vazios internos preenchidos por gotas de asfalto. Como exemplo pode-se citar a gilsonita e o xisto.

- Asfaltos nativos ou naturais: São encontrados em um estado físico muito duro e associados quase sempre a impurezas minerais em depósitos naturais, sendo que para sua utilização é necessário ser realizada uma purificação.
- Asfaltos de petróleo: São os asfaltos mais comuns no dia a dia, principalmente em serviços de pavimentação. Obtidos por processos industriais de refinação do petróleo de base asfáltica, sempre isentos de qualquer tipo de impureza.

4.3 CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO (CAP)

De acordo com Baldo (2007) os cimentos asfálticos de petróleo, ou simplesmente CAP, possuem em grande parte do seu volume hidrocarbonetos não voláteis pesados, chamados betume, sendo extraídos do petróleo primário por meio de refinamento, e utilizado principalmente na pavimentação. Possuem cor negra ou marrom escuro, são altamente viscosos a temperaturas elevadas e sólidos a temperatura ambiente, possuem como característica principal a capacidade de unir (aglutinar) os agregados a ele misturados além de apresentar alta impermeabilidade e flexibilidade, insolubilidade em água e durabilidade relativa ao seu uso.

A norma DNIT 095/2006 – EM, afirma que o cimento asfáltico de petróleo (CAP) deve possuir as qualidades e consistências próprias para a aplicação na engenharia civil, na execução de obras de pavimentos através da sua obtenção específica através do refino de petróleo. A palavra CAP, procede os números que indicam a penetração, que é realizada a uma temperatura de 25° C variando entre 5 e 300 mm sob a força peso de uma carga de 100 g aplicada durante 5 segundos, das variações do cimento asfáltico, que necessitam ser homogêneos, não conter traços de água e não espumar quando aquecidos a temperaturas de 175° C.

De acordo com a norma DNIT 095/2006, o clima brasileiro permitiu a seleção, através da prática, somente de algumas variações de cimentos asfálticos que obtiveram melhores resultados (TAB 1), sendo estes os CAP's: 30-45, 50-70, 85-100 e 150-200, que derivaram dos CAP's iniciais: 30-40, 40-50, 50-60, 60-70, 70-85, 85-100, 100-120, 120-150, 150-200 e 200-300, utilizados no restante dos países.

Tabela 1 - Especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP) - Classificação por penetração

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	LIMITES			
		CAP 30 / 45	CAP 50 / 70	CAP 85 / 100	CAP 150 / 200
Penetração (100 g, 5 s, 25°C)	0,1mm	30-45	50-70	85-100	150-200
Ponto de amolecimento, mínimo	°C	52	46	43	37
Viscosidade Saybolt Furol	s				
a 135°C, mínimo		192	141	110	80
a 150°C, mínimo		90	50	43	36
a 177°C		40-150	30-150	15-60	15-60
OU					
Viscosidade Brookfield	cP				
a 135°C, SP 21, 20 rpm, mínimo		374	274	214	155
a 150°C, SP 21, mínimo		203	112	97	81
a 177°C, SP 21		76-285	57-285	28-114	28-114
		(1,5) a	(1,5) a	(1,5) a	(1,5) a
Índice de susceptibilidade térmica					
		(+0,7)	(+0,7)	(+0,7)	(+0,7)
Ponto de fulgor mínimo	°C	235	235	235	235
Solubilidade em tricloroetileno, mínimo	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5
Ductilidade a 25°C, mínimo	cm	60	60	100	100
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163°C, 85					
mínimo					
Varição em massa, máximo	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5
Ductilidade a 25°C, mínimo	cm	10	20	50	50
Aumento do ponto de amolecimento,					
	°C	8	8	8	8
máximo					
Penetração retida, mínimo	%	60	55	55	50

4.4 CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO (CAP) POLIMÉRICO

Os CAP's, como já mencionados, são os materiais responsáveis pela aglutinação dos agregados, e são importantíssimos na fabricação do CBUQ, sendo assim, as refinarias estão sempre buscando por melhorias e aprimoramentos para a criação de CAP's que possam se tornar mais rígidos ao receberem esforços (sofrendo menos deformações) e mais moles ao aliviarem tais esforços (melhor recuperação elástica) (BALDO, 2007)

De acordo com Brûle (1996 apud BALDO, 2007, p. 124), os cimentos asfálticos modificados com a adição de polímeros macromoleculares termoplásticos (plastômeros e elastômeros) em meados de 1970, com os objetivos principais de:

- Aumentar a coesão do material (CAP).
- Ter como resultado a baixa fluência do CAP.
- Reduzir a viscosidade à temperatura de aplicação.
- Abaixa a suscetibilidade térmica do CAP.
- Fazer com que o CAP apresente resistência elevada à deformação plástica, à fissura e à fadiga.
- Fazer com que se consiga boa adesividade.
- Melhorar a resistência ao envelhecimento.

De acordo com DNER (1998 apud BALDO, 2007, p. 127), compostos orgânicos de pesos moleculares múltiplos de variação entre 10^3 a 10^6 e unidades químicas repetidas em cadeias, são denominados polímeros.

Polímeros são matérias orgânicos extraídos diretamente da natureza, a partir de óleos lubrificantes, cortiças, madeiras e dentre outros por exemplo, mas podem também serem elaborados artificialmente através da união de compostos de moléculas pequenas (monômeros).

A classificação dos polímeros de acordo com DNER (1998 apud BALDO, 2007, p. 127), são:

- Termofixos - Quando submetidos ao calor, endurecem de maneira irreversível, como o poliuretano e a resina epóxi;
- Termoplásticos - que amolecem quando submetidos ao calor e endurecem quando resfriados, como o polietileno, o polipropileno e o EVA (Etileno Acetato de Vinila);

- Elastômeros - possuem propriedades elásticas semelhantes às borrachas, que ao receberem calor, decompõem-se antes mesmo de amolecer, como o SBR (Estireno-Butadieno-Rubber);
- Elastômeros termoplásticos - que apresentam comportamento de termoplástico quando são aquecidos e continuam elásticos quando resfriados, como o SBS (Estireno-Butadieno-Estireno) e a borracha vulcanizada.

Os termofixos, atuando como resinas epóxi, obtêm um resultado memorável de ótima qualidade como ligantes, mas possuem um contra, pois necessitam de um catalisador para endurecerem, assim sua viscosidade da mistura tem uma queda muito rápida, impedindo muitas vezes o seu emprego em misturas asfálticas.

Os polímeros de natureza termoplástica fazem simplesmente o aumento da consistência da massa asfáltica, assim não modificando o CAP.

Os elastômeros absorvem níveis elevados de deformação elástica, mas não podem ser adicionados ao CAP por não poderem ser aquecidos, assim são emulsificados separadamente em fase aquosa para então serem unidos.

Já os polímeros elastômeros termoplásticos (TAB. 2), suportam muito bem altas temperaturas do CAP, como no caso do SBS, que é o polímero mais utilizado na pavimentação, assim trabalhando como molas de suspensão elástica, melhorando a recuperação, aumentando a viscosidade, consistência e ponto de amolecimento. O Brasil por se tratar de um país com clima tropical, altas temperaturas já são muito comuns, assim quando ocorrem aumentos de temperatura na mistura asfáltica ultrapassando até mesmo o ponto de amolecimento do CAP, o polímero elastômero termoplástico consegue reter o aumento do fluxo viscoso, aumentando a estabilidade do pavimento.

Tabela 2 - Características do cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero elastomérico

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	LIMITES		
		CAP 55/75	CAP 60/85	CAP 65/90
Penetração (100 g, 5 s, 25°C)	0,1mm	40-70	40-70	40-70
Ponto de amolecimento, mínimo	°C	55	60	65
Viscosidade Brookfield	cP			
a 135°C, SP 21, 20 rpm, máximo		3000	3000	3000
a 150°C, SP 21, 50 rpm, máximo		2000	2000	2000
a 177°C, SP 21, 100rpm, máximo		1000	1000	1000
Ensaio de separação de fase, máximo	°C	5	5	5
Ponto de fulgor mínimo	°C	235	235	235
Recuperação elástica a 25 °C, 20 cm, mínimo	%	75	85	90
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163°C, 85 mínimo				1,0
Varição em massa, máximo	% massa	1,0	1,0	
Varição do PA, máximo	°C	-5 a +7	-5 a +7	-5 a +7
Porcentagem de penetração original, mínimo	%	60	60	60
Porcentagem de recuperação elástica original a 25°C, mínimo	%	80	80	80

Fonte: NORMA DNIT 129/2011 - EM, 2011, p. 3

4.5 AGREGADOS

A construção civil em geral utiliza agregados, em especial, na fabricação do CBUQ, eles têm a função de dar a mistura durabilidade, resistência e adesividade ao ligante. São conjunto de grãos minerais que variam suas dimensões dentro de limites pré-determinados por peneiras e podem ser naturais ou artificiais, britados ou não britados. (BALDO, 2007)

4.5.1 CALCÁRIO

São rochas de origem sedimentar ou metamórfica, ricas em carbonatos de cálcio e magnésio e possuem variações como: calcífero, dolomítico, dolomita e magnesiano. Geralmente as britas de origem calcária possuem uma forma boa, adesividade e geração de grãos finos de boa qualidade e facilidade de britagem, mas possuem contras como alta porosidade, fazendo com que sua absorção de CAP seja maior, além do rápido polimento da superfície sujeita pela ação do tráfego quando aplicados na pavimentação. (NOGAMI, 1976 apud BALDO, 2007, p. 99).

4.5.2 GNAISSE

São rochas de origem metamórfica, formadas por tectonismo intenso e temperaturas muito elevadas, ricas em mica, quartzo e feldspato e possuem uma curiosidade na sua formação que são o aparecimento de listras. As ortognaisses provem de rochas ígneas e as paragnaisses provem de rochas sedimentares. As rochas denominadas gnaisses apresentam elevada acidez, que na maioria das vezes prejudica a adesividade, o que gera menor absorção de CAP na pavimentação, geram fragmentos lamelares abundantes e os grãos finos gerados são abundantes. Possuem contras como a formação de britas heterogêneas, assim, não mantendo um padrão só, sendo na maioria das vezes angulares esféricas. (NOGAMI, 1976 apud BALDO, 2007, p. 99).

4.6 GRANULOMETRIA DE AGREGADOS

A granulometria dos agregados os classifica de acordo com o tamanho dos grãos, assim o material a ser analisado é depositado em um conjunto de peneiras de um agitador mecânico, e a quantidade de material retido em cada malha das peneiras é aferido para a montagem da curva granulométrica.

Os agregados em geral são formados por grãos de diversos tamanhos, por isso as peneiras são normatizadas, e feitas no formato de caixilhos circulares, possuindo em seu interior telas metálicas com aberturas quadradas crescentes geometricamente, assim cada uma é o dobro da anterior e a metade da subsequente. (BAUER, 2000; BERNUCCI, 2006).

4.6.1 AGREGADOS MIÚDOS

De acordo com a norma DNER-ME 083/98, os agregados miúdos são considerados por peneiramentos, os materiais como, areias e pedriscos diversos com diâmetro entre 9,5 mm e 0,425 mm, necessitando de uma massa mínima para a amostra de 1 kg.

4.6.2 AGREGADOS GRAÚDOS

De acordo com a norma DNER-ME 083/98, os agregados graúdos são considerados por peneiramentos, os materiais com diâmetros maiores que 9,5 mm, sendo eles, britas e pedras marroadas. Para a realização dos ensaios granulométricos de agregados graúdos a amostra mínima é de 5 kg.

4.6.3 FÍLER

A palavra que vem do inglês e significa material de enchimento, segundo Baldo (2007), o fíler é considerado como a fração mais fina, originária da britagem de rochas, lateritas ou pedregulhos, com diâmetro abaixo de 0,425 mm. Em outras palavras esse material é utilizado para o preenchimento parcial dos vazios que são formados nas misturas, para a produção de asfalto, entre os agregados graúdos e miúdos, além de proporcionar um aumento da viscosidade do CAP, incrementar o ponto de amolecimento, a estabilidade, o módulo de resiliência e a resistência da mistura asfáltica. Existem contras também na utilização do fíler em excesso, como o aumento do consumo de cimento asfáltico de petróleo na fabricação de CBUQ.

4.7 CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE (CBUQ)

Segundo Senço (2007), o concreto betuminoso usinado a quente, ou somente CBUQ, é uma mistura composta de agregados graúdo e miúdos, intimamente unidos pelo cimento asfáltico de petróleo (CAP), que no caso, é o betume. A mistura deve ser muito bem dosada, principalmente no requisito CAP, para que possa satisfazer todas as normas, que são rigorosas nesse aspecto. O concreto betuminoso possui o termo, a quente, por ser misturado em uma usina que irá elevar os agregados e o CAP a altas temperaturas.

De acordo com a Pesquisa CNT de Rodovias (2017), o CBUQ, no Brasil, é considerado a maneira mais fácil e tradicional de pavimentar-se vias, visto que, 95% da malha rodoviária existente é composta de CBUQ.

4.8 FABRICAÇÃO DO CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE (CBUQ)

Segundo Baldo (2007), na fabricação do CBUQ, a usina que irá produzi-lo, deve contar com silos que irão fazer a dosagem separada dos agregados que vão fazer parte da mistura por meio de esteiras com células de carga, onde estes agregados deverão estar secos e com baixa umidade no final do tambor secador, que tem esta finalidade, possibilitada por uma chama do queimador que existe em seu interior, deixando a mistura dos agregados a uma temperatura média de 175° C, não ultrapassando os 177° C e sempre respeitando os 10° C acima da temperatura do CAP.

O pátio para a instalação da usina para a fabricação de CBUQ deve conter uma grande área ao seu entorno com capacidade para a estocagem dos agregados próximo aos silos da usina, onde o material será utilizado, sendo que esta área deve conter estruturas que não permitam a contaminação de um agregado com o outro além de proteção contra chuvas, garantindo que a umidade dos agregados não se eleve em dias chuvosos, fazendo com que a usina reduza sua produção e aumente o consumo de combustível para a retirada da umidade excessiva dos agregados.

No pátio também fica estocado o CAP, em tanques térmicos, com sistema de serpentinas capazes de aquecer o material colocado dentro deles até a temperatura ideal de trabalho, visto que a temperatura do CAP 50-70 ideal para trabalho é de 150° C e a do CAP 60-85 polimérico é de 175° C.

Em usinas de CBUQ volumétricas, os agregados são depositados em silos separados, posteriormente passam por correias transportadoras que irão pesá-los individualmente e depois jogá-los para uma correia transportadora central que vai levar os agregados grosseiramente misturados até o secador, que consiste em um cilindro giratório que vai realizar a mistura completa, composto por um maçarico que vai realizar a secagem com elevação da temperatura até o ideal. Após esse processo a mistura é levada ao misturador, onde são adicionados o CAP dosado, já aquecido a temperatura ideal, e o fíler, que resulta do soprador e exaustor que ficam no secador de agregados da usina, após isso a mistura é encaminhada ao elevador e

posteriormente para o silo de descarga, que fazem o transporte da massa do misturador para o caminhão que vai realizar o transporte até o local de aplicação.

4.9 FAIXAS GRANULOMÉTRICAS

De acordo com a norma DNIT 031/2006 – ES, as faixas granulométricas foram criadas para diferenciar e identificar os variados tipos de misturas asfálticas existentes. A faixa A é considerada mais aberta, resumindo, possui maior índice de vazios, grãos maiores e geralmente utilizada em camadas de regularização ou em camadas de ligação. A faixa B é a faixa intermediária, geralmente utilizada em camadas de ligação ou em camadas de rolamento. A faixa C, é a faixa que possui o menor índice de vazios, ou seja, é a massa mais fina, que é utilizada somente para camadas de rolamento (TAB. 3).

Tabela 3 - Faixas granulométricas e requisitos para concreto asfáltico

Série ASTM	Peneira de malha quadrada Abertura (mm)	% em massa, passando			Tolerâncias
		A	B	C	
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%
Nº 4	4,8	25 - 50	28 - 60	44 - 72	± 5%
Nº 10	2,0	20 - 40	20 - 45	22 - 50	± 5%
Nº 40	0,42	10 - 30	10 - 32	8 - 26	± 5%
Nº 80	0,18	5 - 20	8 - 20	4 - 16	± 3%
Nº 200	0,075	1 - 8	3 - 8	2 - 10	± 2%
Asfalto solúvel no CS2(+) (%)		4,0 - 7,0	4,5 - 7,5	4,5 - 9,0	± 0,3%
		Camada de ligação (Binder)	Camada de ligação e rolamento	Camada de rolamento	

Fonte: NORMA DNIT 031/2006 - ES, 2006, p. 5

Além disso, a norma DNIT 031/2006 – ES, estabelece os principais parâmetros para a fabricação do CBUQ (TAB. 4)

Tabela 4 - Características mínimas para execução de CBUQ

Características	Método de Ensaio	Camada de rolamento	Camada de ligação (Binder)
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: NORMA DNIT 031/2006 - ES, 2006, p. 5

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Após a fabricação de um traço de CBUQ, que nada mais é do que a mistura dos agregados graúdos e miúdos ao CAP em suas quantidades pré determinadas e aquecidas, em uma usina, para a determinação de índices principais como fluência da massa asfáltica e estabilidade, executou-se dois ensaios. O ensaio granulométrico para a determinação de quais agregados foram utilizados no traço e o Ensaio de estabilidade Marshall, que definiu índices como volume de vazios, vazios do agregado mineral, vazios cheios de betume, relação de betumes vazios, densidade, estabilidade e fluência do material. O traço base de CBUQ utilizado para a realização dos ensaios foi composto por agregados graúdos ou miúdos gnáissicos da Mineradora X juntamente misturados com agregados graúdos ou miúdos calcários da Mineradora Y com CAP sem ou com polímeros fornecidos e misturados na usina volumétrica da Empresa Z.

5.1 PROCEDIMENTOS EM LABORATÓRIO

5.1.1 AGREGADOS

Para a realização dos ensaios foram utilizados agregados de duas mineradoras existentes em Campo Belo MG. Os agregados graúdos e miúdos de rochas sedimentares calcárias (FIG. 3 e 4) que foram extraídos da mineradora localizada na estrada vicinal Campo Belo – Martins, no km 10,1, e os agregados graúdos e miúdos de rochas metamórficas gnáissicas (FIG. 5 e 6) que foram extraídos da mineradora localizada nas margens da rodovia BR – 369, no km 2.

Figura 3 - Agregado graúdo calcário



Fonte: Autor 2018

Figura 4 - Agregado miúdo calcário



Fonte: Autor 2018

Figura 5 - Agregado graúdo gnáissico



Fonte: Autor 2018

Figura 6 - Agregado miúdo gnáissico



Fonte: Autor 2018

Em ambos os casos as amostras das duas mineradoras foram coletadas em pontos diferentes dos montes que existem de estoque no pátio, utilizando uma concha caracol e sendo armazenadas em sacos plásticos com etiquetas para a correta

identificação das mesmas, procurando sempre demonstrar a real condição e natureza dos materiais, conforme a norma DNER-PRO 120/97.

Depois de realizada a coleta dos materiais, estes foram reduzidos por quarteramento de acordo com a norma DNER-PRO 199/96. Com uma concha de misturar material e uma colher de pedreiro foram feitas as divisões até a obtenção de 132 g de brita 1, 525 g de brita 0 e 487 g de pó de pedra para cada corpo de prova gerado, procurando enquadrar na Faixa C do DNIT.

5.1.2 ENSAIO GRANULOMÉTRICO

Como o traço de CBUQ já era existente, criado de acordo com a Faixa C do DNIT, foi necessário realizar o enquadramento dos agregados nele, para isso utilizou-se a norma DNER-ME 083/98, que consta como materiais necessários:

Peneiras redondas de malha quadrada metálica com aberturas de: 19,1 mm, 12,7 mm, 9,5 mm, 4,8 mm, 2,0 mm, 0,42 mm, 0,18 mm e 0,075 mm; Agitador mecânico (FIG. 7) de peneiras com capacidade para até seis peneiras, tampa e fundo; Balança com capacidade para 20 kg e precisão de 0,1 g; Escova para limpeza de peneiras; Tabuleiros metálicos; Concha de cereal; Fogão a gás; Frigideira; e colher.

Para a realização dos ensaios nas diferentes configurações de agregados, os materiais foram secos em uma frigideira convencional de cozinha, posteriormente pesados e peneirados individualmente, utilizando sempre peneiras com uma sequência decrescente de abertura. Após montar as peneiras, o agitador mecânico foi ligado por 15 minutos, variando um pouco de um agregado para outro. Após isso os materiais foram reservados em sacos plásticos para futuras pesagens nas quantidades estabelecidas pelo traço, para que os restantes dos ensaios possam ser realizados.

As misturas asfálticas criadas foram compostas por brita 1 (19 mm), brita 0 (12,5 mm) e pó de pedra (4,8 mm), com materiais de natureza gnáissica e calcária nas mesmas proporções e granulometrias similares.

Figura 7 - Agitador mecânico de peneiras



Fonte: Autor 2018

5.1.3 ENSAIO MARSHALL

O ensaio Marshall é o ensaio com a função de determinar a estabilidade do CBUQ, ou seja, a carga máxima suportada em um corpo cilíndrico com as dimensões conhecidas, sendo a carga expressada em Newton (N), a densidade, os vazios do agregado mineral, os vazios cheios de betume, o volume de vazios, a relação de betume vazios e a fluência, que é a deformação total sofrida pelo corpo de prova, desde a carga inicial nula até a carga máxima, sendo expressa em décimos de milímetro.

Para a realização dos ensaios foram utilizados, segundo norma DNER-ME 043/95, os seguintes materiais:

Prensa capaz de aplicar cargas de até 39,2 kN com erro inferior a 24,5 N mecânica ou manual, com êmbolo movimentando a uma velocidade de 5 cm por minuto, equipada com um anel dinamométrico com capacidade de 22,2 kN e defletômetro com graduação de 0,0025 mm, para medir encurtamentos e avaliação

de carga; Molde de compactação em aço, constituído de anel superior, anel inferior e placa base; Estufa com capacidade de manter a amostra em temperaturas de até 200°C; Repartidores de amostra de 1,3 cm e de 2,5 cm de abertura; Balança com capacidade de 20 kg e precisão de 0,1 g; Bandejas metálicas; Extrator de corpo de prova hidráulico, em aço e em forma de disco; Colher de metal tipo jardineiro; Aparelhagem para mistura que produza um material homogêneo, sem perda e com capacidade de cerca de 5 litros; Recipiente em aço estampado, cilíndrico, com bico vertedor e capacidade para 500 ml; Termômetro de vidro ou haste metálica, com graduação e 10 a 200°C, para medir temperatura dos agregados, betume, banho d'água e mistura betuminosa; Espátula de aço com ponta arredondada, com lâmina de 18 cm de comprimento e 3 cm de largura; Base de compactação em madeira; Soquete de compactação, de aço, com 4.540 g de massa e altura de queda de 45,72 cm; Medidor de fluência, com graduações de 0,25 mm; Paquímetro com exatidão de 0,1 mm; Banho maria com capacidade para 9 corpos de prova, equipado com grade a 50 mm acima do fundo; Pinça para manipulação dos corpos de prova; Pincel, papel filtro e parafina, e; Molde de compressão de aço.

No início do processo, os agregados foram pesados, misturados e aquecidos. Em seguida, foi adicionado o CAP, já aquecido, sendo misturado rapidamente por 2 a 3 minutos, até a completa cobertura dos agregados

Para a preparação dos corpos de prova, o CAP teve sua temperatura elevada até 150° C aproximadamente, e os agregados de 10 a 15° C acima da temperatura do CAP. Para a elevação da temperatura dos materiais utilizados foi utilizado uma estufa (FIG. 8)

Figura 8 - Estufa elétrica



Fonte: Autor 2018

Após realização da mistura, o material foi colocado no molde, e aquecido novamente de 90 a 150° C para a realização da compactação, que procedeu com 75 golpes de cada lado do corpo de prova. (FIG. 9)

Figura 9 - Molde para compactação



Fonte: Autor 2018

Realizada a compactação, o corpo de prova foi colocado cuidadosamente em uma superfície lisa e plana, onde permaneceu à temperatura ambiente durante no mínimo 12 horas, para que seu resfriamento fosse realizado por completo.

Para o procedimento, sempre deve ser preparado a quantidade de material necessária para moldar um corpo de prova por vez.

Na realização do processo, foram moldados 3 corpos de prova com média de 1,200 g e 63,5 mm de altura para cada traço, e a cada 3 corpos de prova a composição do traço era diferente, variando origem do agregado miúdo e graúdo, e composição do CAP.

A determinação da altura do corpo de prova foi realizada através de quatro medidas com um paquímetro em posições distintas e opostas na área do corpo de prova, assim adotando a média aritmética das medidas obtidas.

A estabilidade e a fluência foram os pontos chave obtidos no ensaio Marshall, mas outros valores também foram levados em consideração no ensaio.

O primeiro valor a ser calculado foi o volume do corpo de prova de massa asfáltica pela equação (1):

$$V = \frac{(Par - Psub)}{\rho a} \quad (1)$$

Onde:

V = volume do corpo de prova de massa asfáltica [cm³];

Par = peso do corpo de prova ao ar [g];

Psub = peso do corpo de prova imerso na água [g];

pa = densidade específica da água $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$.

Após esse cálculo, o próximo passo continuou com a determinação da densidade aparente do corpo de prova (EQ. 2):

$$\rho_{ap} = \frac{Par}{V} \quad (2)$$

Onde:

ρ_{ap} = densidade aparente do corpo de prova $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$;

Par = peso do corpo de prova ao ar [g];

V = volume do corpo de prova de massa asfáltica [cm³].

Para a densidade máxima teórica, utilizou-se a seguinte equação (EQ. 3):

$$DMT = \frac{100}{\frac{\%CAP}{\rho_{CAP}} + \frac{100-\%CAP}{\rho_{agr}}} \quad (3)$$

Onde:

DMT = densidade máxima teórica $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$;

%CAP = percentual de CAP utilizado na mistura asfáltica em relação ao peso total do corpo de prova [%];

ρ_{CAP} = densidade do CAP $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$;

ρ_{agr} = densidade real dos agregados $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$.

Com todos os resultados em mãos, o próximo passo foram os cálculos de volume de vazios, que nada mais são do que a porcentagem de vazios presentes na massa asfáltica após compactação (EQ. 4):

$$V_v = 100 - \left(\frac{\rho_{ap}}{DMT} \times 100\right) \quad (4)$$

Onde:

V_v = volume de vazios da massa asfáltica [%];

ρ_{ap} = densidade aparente do corpo de prova $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$;

DMT = densidade máxima teórica $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$.

Vazios cheios de betume (VCB), que foram os vazios preenchidos por asfalto (EQ. 5):

$$VCB = \frac{\%CAP}{\rho_{CAP}} \times \rho_{ap} \quad (5)$$

Onde:

VCB = Vazios cheios de betume [%];

%CAP = percentual de CAP utilizado na mistura asfáltica em relação ao peso total do corpo de prova [%];

ρ_{CAP} = densidade do CAP $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$;

ρ_{ap} = densidade aparente do corpo de prova $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$.

Vazios do agregado mineral (VAM), sendo os vazios preenchidos pelo agregado na mistura (EQ. 6):

$$VAM = Vv + VCB \quad (6)$$

Onde:

VAM = Vazios do agregado mineral [%];

Vv = Volume de vazios [%];

VCB = Vazios cheios de betume [%].

Por fim, a relação betume vazios (RBV), foram identificados pela equação abaixo (EQ. 7):

$$RBV = \frac{VCB}{VAM} \times 100 \quad (7)$$

Onde:

RBV = Relação betume vazios [%];

VCB = Vazios cheios de betume [%];

VAM = Vazios do agregado mineral [%].

Após a execução de todos os ensaios, foi feita a comparação com a Tabela 4 para a certificação de que todos os resultados se enquadraram nos valores limites permitidos.

5.1.3.1 OBTENÇÃO DA ESTABILIDADE MARSHALL E DA FLUÊNCIA

Depois de concluídos, e os passo anteriores seguidos, os corpos de prova foram colocados em banho maria (FIG. 10) por cerca de 30 minutos a uma temperatura média de 60° C, ou se por opção, poderiam ter sido colocados em uma estufa por duas horas na mesma temperatura. Após o período de tempo determinado os corpos de prova foram colocados imediatamente no molde de compressão, que já estava lubrificado e com medidor de fluência ajustado na posição para o ensaio.

Figura 10 - Aparelho banho maria



Fonte: Autor 2018

A prensa utilizada para os ensaios (FIG. 11) percorreu o êmbolo com uma velocidade constante de 50 mm por minuto, até rompimento do corpo de prova, onde no defletômetro, foi observado a leitura máxima, convertida em N, através do gráfico de calibração do anel dinamométrico.

Figura 11 - Prensa Marshall



Fonte: Autor 2018

A cargas obtidas nos ensaios foram consideradas como estabilidade das misturas asfálticas, que ainda foram corrigidas por um fator em função da altura dos corpos de prova pela equação:

$$f = 927,23 \times h - 1,64 \quad (8)$$

Onde:

f = fator;

h = espessura do corpo de prova.

Assim a estabilidade Marshall foi encontrada pela média aritmética da carga máxima encontrada e corrigida, de no mínimo 3 corpos de prova, como executado, e

a fluência pela média aritmética dos valores observados no medidor no final de cada ensaio.

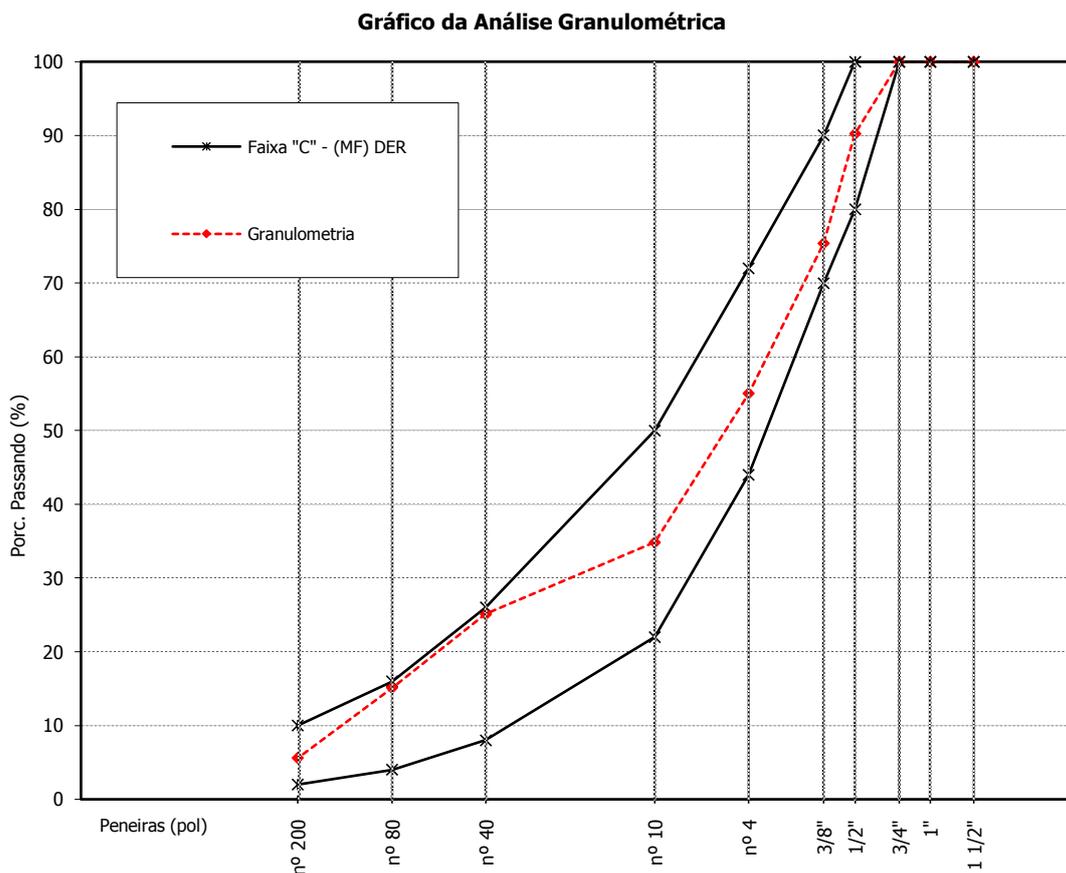
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 GRANULOMETRIA

A faixa granulométrica utilizada foi a mesma em todos os corpos de prova, procurando obter sempre resultados precisos. O traço criado foi enquadrado na Faixa-C do DNIT, sendo composto de 10% de brita 1, 35% de brita 0, 55% de pó de pedra e 4,9% de CAP, que em matéria de peso totalizaram aproximadamente 1200 g.

Segue abaixo conforme GRAF. 1 e TAB. 5 a granulometria utilizada nos 12 corpos de prova.

Gráfico 1 - Curva granulométrica dos agregados graúdos e miúdos utilizados no ensaio



Fonte: Autor 2018

Tabela 5 - Granulometria utilizada

Peneiras	Traço utilizado [% de material passante]	Especificação DNER-ES 031/2006 - Faixa C	
		Limite Máximo [% de material passante]	Limite Mínimo [% de material passante]
3/4"	100,0	100,0	100,0
1/2"	90,0	80,0	100,0
3/8"	75,0	70,0	90,0
Nº 4	55,0	44,0	72,0
Nº 10	35,0	22,0	50,0
Nº 40	26,0	8,0	26,0
Nº 80	16,0	4,0	16,0
Nº 200	6,0	2,0	10,0

Fonte: Autor 2018

A partir do gráfico 1 e da tabela 5, observa-se que o traço utilizado nos 12 corpos de prova se enquadra em todas as peneiras na Faixa-C do DNIT. O material passante na peneira 3/4" foi 100%, na peneira 1/2", 90%, na peneira 3/8", 75%, na peneira Nº 4, 55%, na peneira Nº 10, 35%, na peneira Nº 40, 26%, na peneira Nº 80, 16% e na peneira Nº 200, 6%.

6.2 ENSAIO MARSHALL

O ensaio Marshall foi executado de acordo com a norma DNIT 031/2006, que determinou todos os métodos de ensaio e parâmetros utilizados, assim procurando sempre por resultados que se aproximem ao máximo de uma mistura asfáltica real fabricada em uma usina. Segue abaixo conforme TAB. 6, TAB. 7, TAB. 8 e TAB.9, os resultados obtidos com os traços pó de pedra gnáissico e brita calcária com CAP 60/85, pó de pedra gnáissico e brita calcária com CAP 50/70, pó de pedra calcário e brita gnáissica com CAP 60/85, pó de pedra calcário e brita gnáissica com CAP 50/70 respectivamente.

Tabela 6 - Resultados obtidos - Pó gnáissico e brita calcária com CAP 60/85

ENSAIO MARSHALL - DNER-ME 043/95						
PÓ GNÁISSICO E BRITA CALCÁRIA COM CAP 60/85						
	Nº C.P.	1	2	3	Limites	
	AO AR	1187,80	1210,30	1186,00		
	Peso do C.P. [g]					
	IMERSO	700,38	710,18	700,43		
(1)	Volume (V) [cm³]	487,42	500,12	485,57		
(2)	Densidade Aparente (ρ_{ap}) [g/cm³]	2,43	2,42	2,44		
(3)	Densidade Máxima Teórica (DMT) [g/cm³]	2,52	2,52	2,52		
(4)	Volume de Vazios (Vv) [%]	3,57	3,96	3,17	3 a 5	
(5)	Vazios Cheios de Betume (VCB) [%]	11,61	11,56	11,66		
(6)	Vazios do Agregado Mineral (VAM) [%]	15,18	15,52	14,83		
(7)	Relação Betume Vazios (RBV) [%]	76,48	74,48	78,62	75 a 82	
	Leitura	1061,00	1036,00	1042,00		
	Fator de Correção da altura dos C.P.	1,06	1,03	1,06		
	Leitura Corrigida	1124,66	1067,08	1104,52		
	Fator de Correção da Prensa	1,31183	1,31183	1,31183		
	Estabilidade Marshall					
	Estabilidade [N]	1475,36	1399,82	1448,94	>500	

Fluência [mm]	5,52	3,61	4,14
---------------	------	------	------

Fonte: Autor 2018

O traço de mistura asfáltica realizado com pó gnáissico e brita calcária com CAP 60/85, obteve como resultados um volume (1) médio de 491,03 cm³, densidade aparente (2) média de 2,43 g/cm³, densidade máxima teórica (3) média de 2,52 g/cm³, volume de vazios (4) médio de 3,56 %, vazios cheios de betume (5) médio de 11,61 %, vazios do agregado mineral (6) médio de 15,17 %, relação betume vazios (7) média de 76,52 %, obtendo assim valores de estabilidade Marshall média de 1441,37 N e fluência média de 4,42 mm. Os resultados obtidos nos ensaios estão todos dentro dos conformes da norma DNIT 031/2006 descritos na tabela 4 deste trabalho.

Tabela 7 - Resultados obtidos - Pó gnáissico e brita calcária com CAP 50/70

ENSAIO MARSHALL - DNER-ME 043/95						
PÓ GNÁISSICO E BRITA CALCÁRIA COM CAP 50/70						
	Nº C.P.	1	2	3	Limites	
	AO AR	1186,80	1194,60	1191,10		
	Peso do C.P. [g]					
	IMERSO	694,83	702,29	695,85		
(1)	Volume (V) [cm ³]	494,97	492,31	495,25		
(2)	Densidade Aparente (ρ _{ap}) [g/cm ³]	2,41	2,42	2,40		
(3)	Densidade Máxima Teórica (DMT) [g/cm ³]	2,52	2,52	2,52		
(4)	Volume de Vazios (V _v) [%]	4,36	3,96	4,76	3 a 5	
(5)	Vazios Cheios de Betume (VCB) [%]	11,52	11,56	11,47		
(6)	Vazios do Agregado Mineral (VAM) [%]	15,88	15,52	16,23		
(7)	Relação Betume Vazios (RBV) [%]	75,54	74,48	75,67	75 a 82	
	Leitura	779,00	805,00	956,00		
	Fator de Correção da altura dos C.P.	1,06	1,04	1,05		
	Leitura Corrigida	825,74	837,20	1003,80		
	Fator de Correção da Prensa	1,31183	1,31183	1,31183		
	Estabilidade Marshall					

	Estabilidade [N]	1083,23	1098,26	1316,81	>500
Fluência [mm]		3,95	5,65	4,73	

Fonte: Autor 2018

O traço de mistura asfáltica realizado com pó gnáissico e brita calcária com CAP 50/70, obteve como resultados um volume (1) médio de 494,17 cm³, densidade aparente (2) média de 2,41 g/cm³, densidade máxima teórica (3) média de 2,52 g/cm³, volume de vazios (4) médio de 4,36 %, vazios cheios de betume (5) médio de 11,51 %, vazios do agregado mineral (6) médio de 15,87 %, relação betume vazios (7) média de 75,23 %, obtendo assim valores de estabilidade Marshall média de 1166,10 N e fluência média de 4,77 mm. Os resultados obtidos nos ensaios estão todos dentro dos conformes da norma DNIT 031/2006 descritos na tabela 4 deste trabalho.

Tabela 8 - Resultados obtidos - Pó calcário e brita gnáissica com CAP 60/85

ENSAIO MARSHALL - DNER-ME 043/95						
PÓ CALCÁRIO E BRITA GNÁISSICA COM CAP 60/85						
	Nº C.P.	1	2	3	Limites	
	AO AR	1201,30	1199,40	1199,50		
	Peso do C.P. [g]					
	IMERSO	702,85	699,85	700,97		
(1)	Volume (V) [cm ³]	498,45	499,55	498,53		
(2)	Densidade Aparente (ρ _{ap}) [g/cm ³]	2,41	2,40	2,40		
(3)	Densidade Máxima Teórica (DMT) [g/cm ³]	2,52	2,52	2,52		
(4)	Volume de Vazios (V _v) [%]	4,36	4,76	4,76	3 a 5	
(5)	Vazios Cheios de Betume (VCB) [%]	11,52	11,47	11,47		
(6)	Vazios do Agregado Mineral (VAM) [%]	15,88	16,23	16,23		
(7)	Relação Betume Vazios (RBV) [%]	77,54	75,67	75,67	75 a 82	
	Leitura	1210,00	810,00	950,00		
	Fator de Correção da altura dos C.P.	1,05	1,03	1,04		
	Estabilidade Marshall	Leitura Corrigida	1270,50	834,30	988,00	

	Fator de Correção da Prensa	1,31183	1,31183	1,31183	
	Estabilidade [N]	1666,68	1094,45	1296,08	>500
	Fluência [mm]	5,10	5,79	5,81	

Fonte: Autor 2018

O traço de mistura asfáltica realizado com pó calcário e brita gnáissica com CAP 60/85, obteve como resultados um volume (1) médio de 498,84 cm³, densidade aparente (2) média de 2,40 g/cm³, densidade máxima teórica (3) média de 2,52 g/cm³, volume de vazios (4) médio de 4,62 %, vazios cheios de betume (5) médio de 11,48 %, vazios do agregado mineral (6) médio de 16,11 %, relação betume vazios (7) média de 76,29 %, obtendo assim valores de estabilidade Marshall média de 1352,40 N e fluência média de 5,56 mm. Os resultados obtidos nos ensaios estão todos dentro dos conformes da norma DNIT 031/2006 descritos na tabela 4 deste trabalho.

Tabela 9 - Resultados obtidos - Pó calcário e brita gnáissica com CAP 50/70

ENSAIO MARSHALL - DNER-ME 043/95					
PÓ CALCÁRIO E BRITA GNÁISSICA COM CAP 50/70					
Nº C.P.		1	2	3	Limites
	AO AR	1197,30	1199,80	1195,80	
	Peso do C.P. [g]				
	IMERSO	700,78	700,73	699,70	
(1)	Volume (V) [cm ³]	496,52	499,07	496,10	
(2)	Densidade Aparente (pap) [g/cm ³]	2,41	2,40	2,41	
(3)	Densidade Máxima Teórica (DMT) [g/cm ³]	2,52	2,52	2,52	
(4)	Volume de Vazios (Vv) [%]	4,36	4,76	4,36	3 a 5
(5)	Vazios Cheios de Betume (VCB) [%]	11,52	11,47	11,52	
(6)	Vazios do Agregado Mineral (VAM) [%]	15,88	16,23	15,88	
(7)	Relação Betume Vazios (RBV) [%]	77,54	75,67	77,54	75 a 82

	Leitura	916,00	576,00	721,00	
	Fator de Correção da altura dos C.P.	1,05	1,03	1,05	
Estabilidade Marshall	Leitura Corrigida	961,80	593,28	757,05	
	Fator de Correção da Prensa	1,31183	1,31183	1,31183	
	Estabilidade [N]	1261,71	778,28	993,12	>500
Fluência [mm]		5,04	5,88	4,11	

Fonte: Autor 2018

O traço de mistura asfáltica realizado com pó calcário e brita gnáissica com CAP 60/85, obteve como resultados um volume (1) médio de 497,23 cm³, densidade aparente (2) média de 2,40 g/cm³, densidade máxima teórica (3) média de 2,52 g/cm³, volume de vazios (4) médio de 4,49 %, vazios cheios de betume (5) médio de 11,50 %, vazios do agregado mineral (6) médio de 15,99 %, relação betume vazios (7) média de 76,91 %, obtendo assim valores de estabilidade Marshall média de 1011,03 N e fluência média de 5,01 mm. Os resultados obtidos nos ensaios estão todos dentro dos conformes da norma DNIT 031/2006 descritos na tabela 4 deste trabalho.

6.3 COMPARATIVO ENTRE CAP 60/85 E CAP 50/70

6.3.1 VAZIOS CHEIOS DE BETUME

Nesta relação foram extraídos dados de vazios cheios de betume das TAB. 6, TAB. 7, TAB. 8 e TAB. 9, que resultaram na TAB. 11 e GRAF. 2 que são comparativos.

Tabela 10 - Média dos resultados de vazios cheios de betume obtidos por meio de cálculos comparando CAP

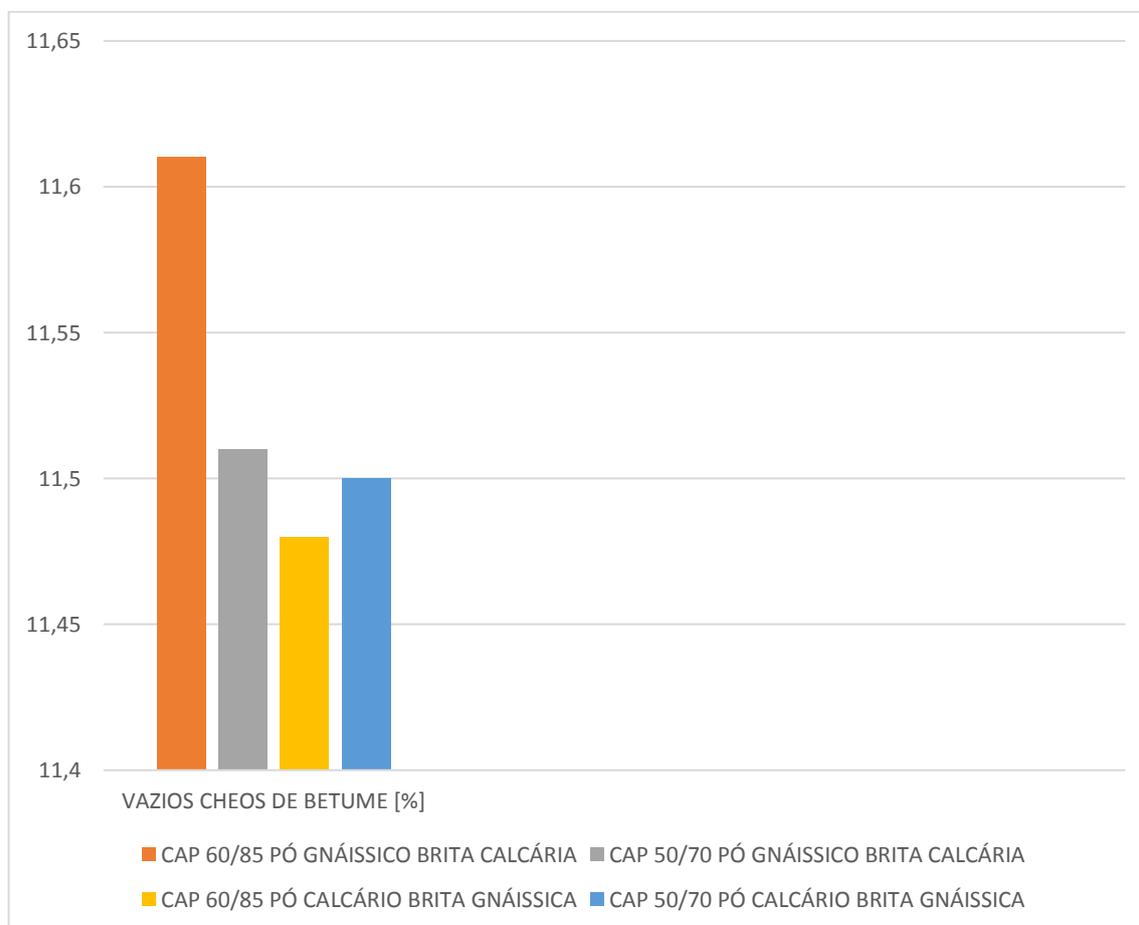
VAZIOS CHEIOS DE BETUME				
	CAP 60/85	CAP 50/70	CAP 60/85	CAP 50/70
	PÓ GNAISSICO BRITA CALCÁRIA	PÓ GNÁISSICO BRITA CALCÁRIA	PÓ CALCÁRIO BRITA GNÁISSICA	PÓ CALCÁRIO BRITA GNÁISSICA
VAZIOS CHEIOS DE	11,61	11,51	11,48	11,50

BETUME
[%]

Fonte: Autor 2018

De acordo com a tabela 10, os cálculos médios de vazios cheios de betume obtidos foram de 11,61% e 11,51% para os traços pó gnáissico e brita calcária com CAP 60/85 e CAP 50/70 respectivamente, além de 11,48% e 11,50% para os traços pó calcário e brita gnáissica com CAP 60/85 e CAP 50/70 respectivamente.

Gráfico 2 - Média dos resultados de vazios cheios de betume obtidos por meio de cálculos comparando CAP



Fonte: Autor 2018

Após a análise do gráfico, percebe-se a diferença de valores de vazios cheios de betume entre os diferentes traços, podendo ressaltar que os traços de pó gnáissico e brita calcária contendo CAP 60/85 possuem um aumento de 0,86%

em relação aos mesmos traços contendo CAP 50/70, e que os traços de pó calcário e brita gnáissica contendo CAP 60/85 possuem um aumento de 0,17% em relação aos mesmos traços contendo CAP 50/70, sendo assim os traços com CAP 60/85 possuem um preenchimento maior de CAP, maior flexibilidade e impermeabilidade. Observa se também que o traço de pó gnáissico e brita calcária com CAP 60/85, possui o maior valor de vazios cheios de betume, sendo assim o que possui maior preenchimento de CAP, flexibilidade e impermeabilidade.

6.3.2 ESTABILIDADE

Nesta relação foram extraídos dados de estabilidade das TAB. 6, TAB. 7, TAB. 8 e TAB. 9, que resultaram na TAB. 11 e GRAF. 3 que são comparativos.

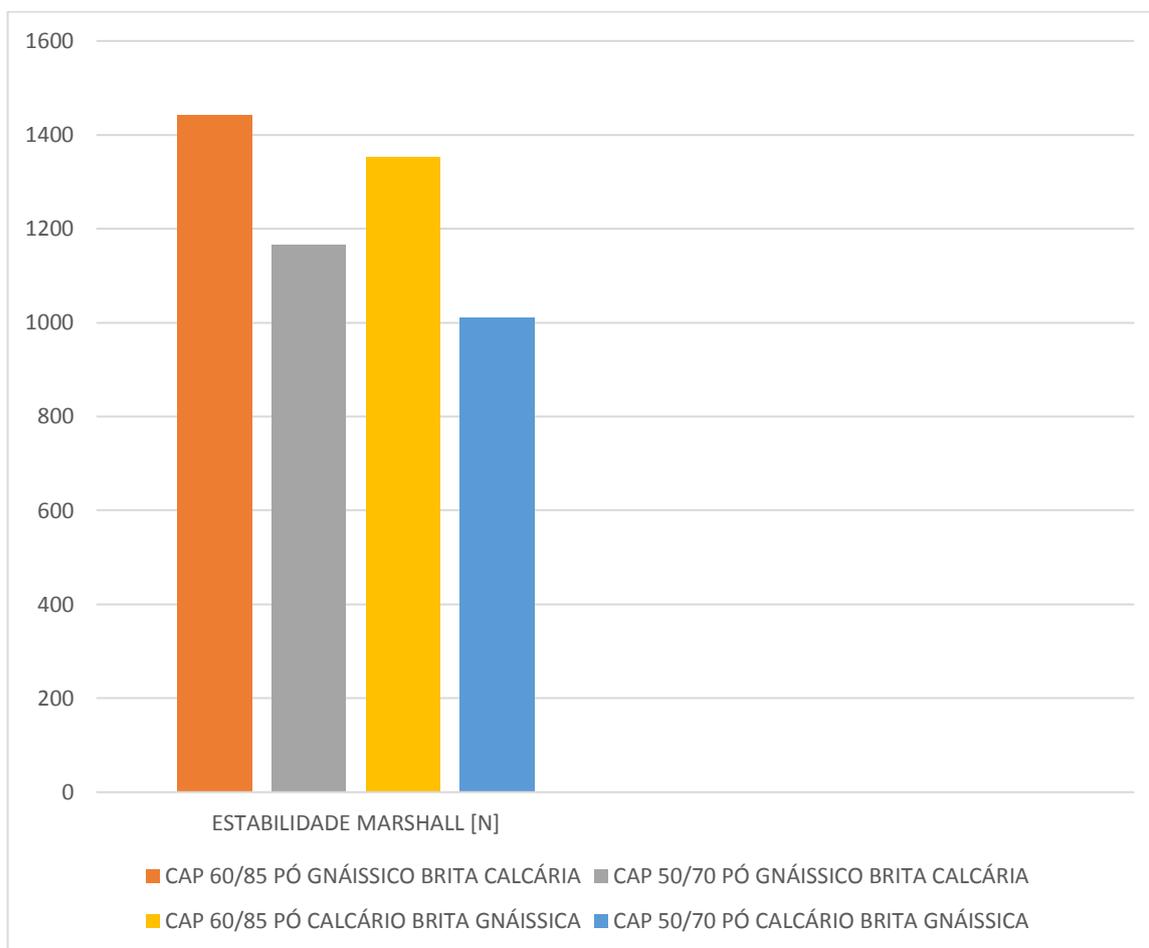
Tabela 11 - Média dos resultados de estabilidade obtidos no ensaio Marshall comparando CAP

ESTABILIDADE MARSHALL				
	CAP 60/85	CAP 50/70	CAP 60/85	CAP 50/70
	PÓ GNAISSICO BRITA CALCÁRIA	PÓ GNÁISSICO BRITA CALCÁRIA	PÓ CALCÁRIO BRITA GNÁISSICA	PÓ CALCÁRIO BRITA GNÁISSICA
ESTABILIDAD E [N]	1441,37	1166,10	1352,40	1011,03

Fonte: Autor 2018

De acordo com a tabela 11, as leituras médias de estabilidade Marshall obtidas foram de 1441,37 N e 1166,10 N para os traços pó gnáissico e brita calcária com CAP 60/85 e CAP 50/70 respectivamente, além de 1352,40 N e 1011,03 N para os traços pó calcário e brita gnáissica com CAP 60/85 e CAP 50/70 respectivamente.

Gráfico 3 - Média dos resultados de estabilidade obtidos no ensaio Marshall comparando CAP



Fonte: Autor 2018

Após a análise do gráfico, percebe-se a diferença de valores de estabilidade Marshall entre os diferentes traços, podendo ressaltar que os traços de pó gnáissico e brita calcária contendo CAP 60/85 possuem um aumento de 23,60 % em relação aos mesmos traços contendo CAP 50/70, e que os traços de pó calcário e brita gnáissica contendo CAP 60/85 possuem um aumento de 33,76 % em relação aos mesmos traços contendo CAP 50/70, sendo assim os traços contendo CAP 60/85 são mais resistentes. Observa-se também que o traço de pó gnáissico e brita calcária com CAP 60/85, possui o maior valor de estabilidade Marshall, sendo assim o mais resistente dentro dos quatro analisados.

6.3.3 FLUÊNCIA

Nesta relação foram extraídos dados de estabilidade das TAB. 6, TAB. 7, TAB. 8 e TAB. 9, que resultaram na TAB. 12 e GRAF. 4 que são comparativos.

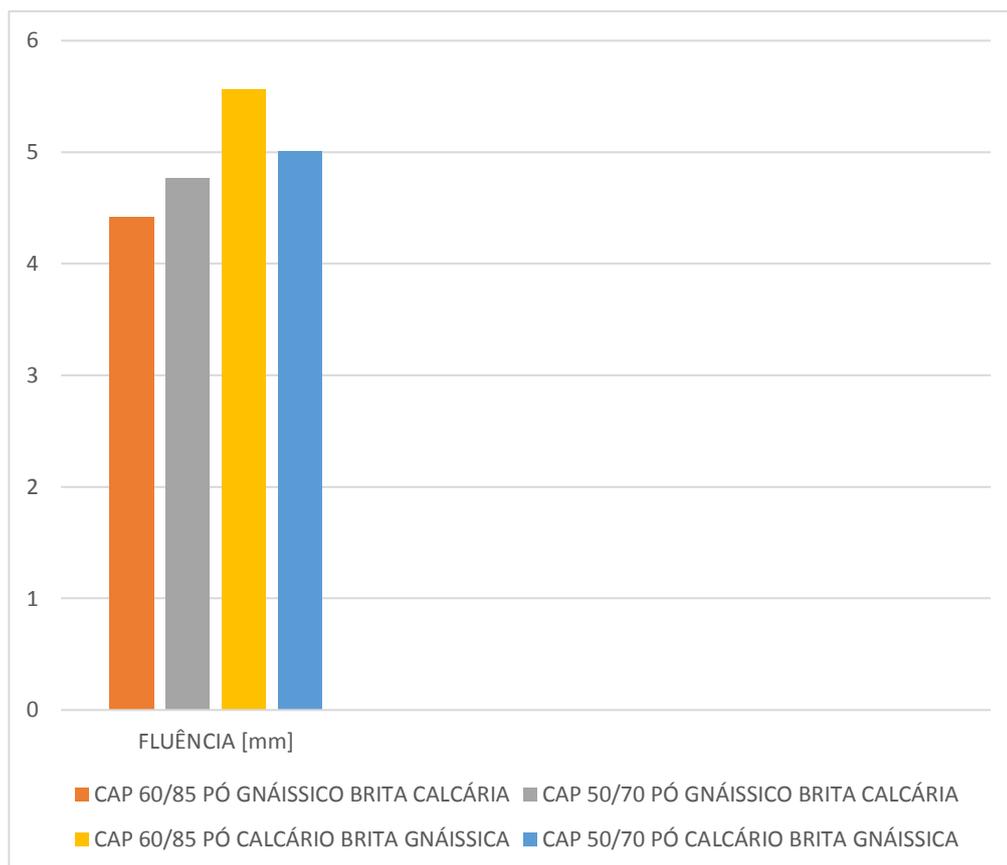
Tabela 12 - Média dos resultados de fluência obtidos no ensaio Marshall comparando CAP

FLUÊNCIA				
	CAP 60/85	CAP 50/70	CAP 60/85	CAP 50/70
	PÓ GNAISSICO BRITA CALCÁRIA	PÓ GNÁISSICO BRITA CALCÁRIA	PÓ CALCÁRIO BRITA GNÁISSICA	PÓ CALCÁRIO BRITA GNÁISSICA
FLUÊNCIA [mm]	4,42	4,77	5,56	5,01

Fonte: Autor 2018

De acordo com a tabela 12, as leituras médias de fluência obtidas foram de 4,42 mm e 4,77 mm para os traços pó gnáissico e brita calcária com CAP 60/85 e CAP 50/70 respectivamente, além de 5,56 mm e 5,01 mm para os traços pó calcário e brita gnáissica com CAP 60/85 e CAP 50/70 respectivamente.

Gráfico 4 - Média dos resultados de fluência obtidos no ensaio Marshall comparando CAP



Fonte: Autor 2018

Após a análise do gráfico, percebe-se a diferença de valores de fluência entre os diferentes traços, podendo ressaltar que os traços de pó gnáissico e brita calcária contendo CAP 50/70 possuem um aumento de 7,91 % em relação aos mesmos traços contendo CAP 60/85, e que os traços de pó calcário e brita gnáissica contendo CAP 60/85 possuem um aumento de 10,97 % em relação aos mesmos traços contendo CAP 50/70, sendo assim os traços contendo valores mais alto de fluência são considerados mais plásticos e com deformações mais permanentes. Observa-se também que o traço de pó calcário e brita gnáissica com CAP 60/85, possui o maior valor de fluência, sendo assim o mais plástico e com deformação mais permanente dentro dos quatro analisados.

6.4 COMPARATIVO ENTRE AGREGADOS PÓ GNÁISSICO/BRITA CALCÁRIA E PÓ CALCÁRIO/BRITA GNÁISSICA

6.4.1 VAZIOS CHEIOS DE BETUME

Nesta relação foram extraídos dados de vazios cheios de betume das TAB. 6, TAB. 7, TAB. 8 e TAB. 9, que resultaram na TAB. 13 e GRAF. 5 que são comparativos.

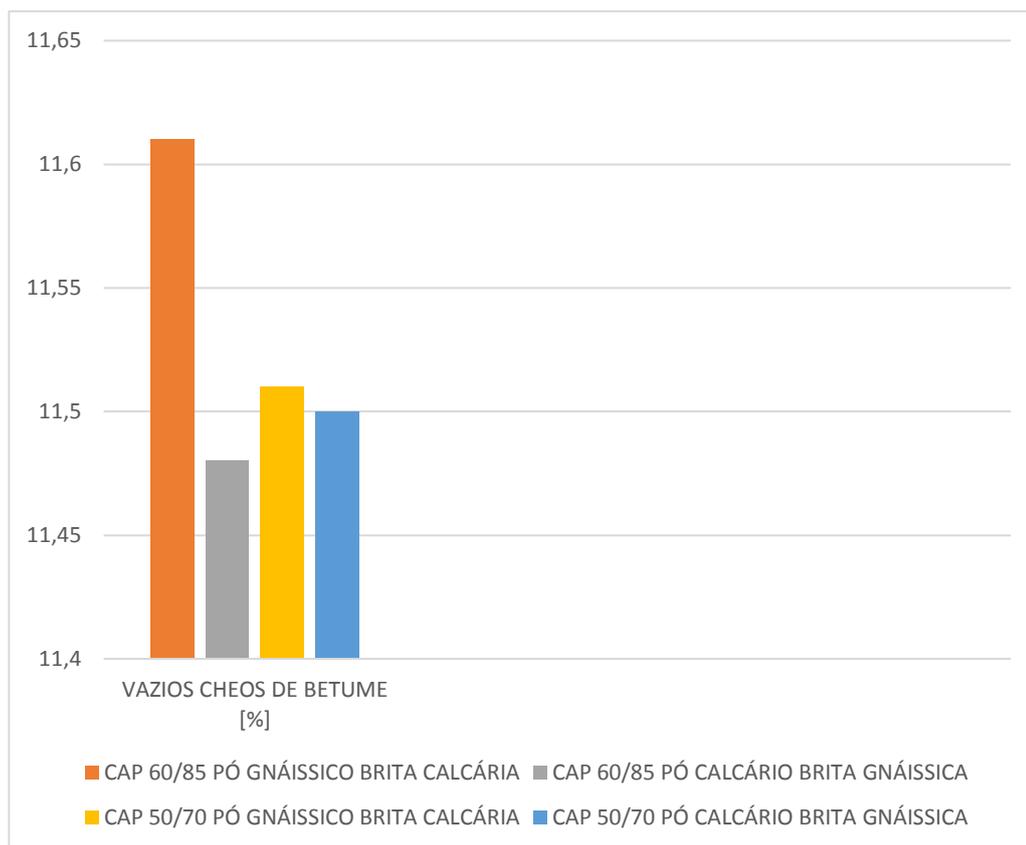
Tabela 13 - Média dos resultados de vazios de betume obtidos por meio de cálculos comparando agregados

VAZIOS CHEIOS DE BETUME				
	PÓ GNAISSICO BRITA CALCÁRIA	PÓ CALCÁRIO BRITA GNÁISSICA	PÓ GNÁISSICO BRITA CALCÁRIA	PÓ CALCÁRIO BRITA GNÁISSICA
	CAP 60/85	CAP 60/85	CAP 50/70	CAP 50/70
VAZIOS CHEIOS DE BETUME [%]	11,61	11,48	11,51	11,50

Fonte: Autor 2018

De acordo com a tabela 13, os cálculos médios de vazios cheios de betume obtidos foram de 11,61% para o traço pó gnáissico e brita calcária e 11,48% para o traço pó calcário e brita gnáissica, ambos com CAP 60/85. Obteve-se os cálculos médios de 11,51% para o traço pó gnáissico e brita calcária e 11,50% para o traço pó calcário e brita gnáissica, ambos com CAP 50/70.

Gráfico 5 - Média dos resultados de vazios cheios de betume obtidos por meio de cálculos comparando agregados



Fonte: Autor 2018

Após a análise do gráfico, percebe-se a diferença de valores de vazios cheios de betume entre os diferentes traços, podendo ressaltar que os traços de CAP 60/85 contendo agregados pó gnáissico e brita calcária possuem um aumento de 1,13 % em relação aos mesmos traços contendo agregados pó calcário e brita gnáissica, e que os traços de CAP 50/70 contendo agregados pó gnáissico e brita calcária possuem um aumento de 0,086 % em relação aos mesmos traços contendo agregados pó calcário e brita gnáissica, sendo assim os traços com agregados pó gnáissico e brita calcária possuem um preenchimento maior de CAP, maior flexibilidade e impermeabilidade. Observa-se também que o traço de agregados pó gnáissico e brita calcária com CAP 60/85, possui o maior valor de vazios cheios de betume, sendo assim o que possui maior preenchimento de CAP, flexibilidade e impermeabilidade.

6.4.2 ESTABILIDADE

Nesta relação foram extraídos dados de estabilidade das TAB. 6, TAB. 7, TAB. 8 e TAB. 9, que resultaram na TAB. 14 e GRAF. 6 que são comparativos.

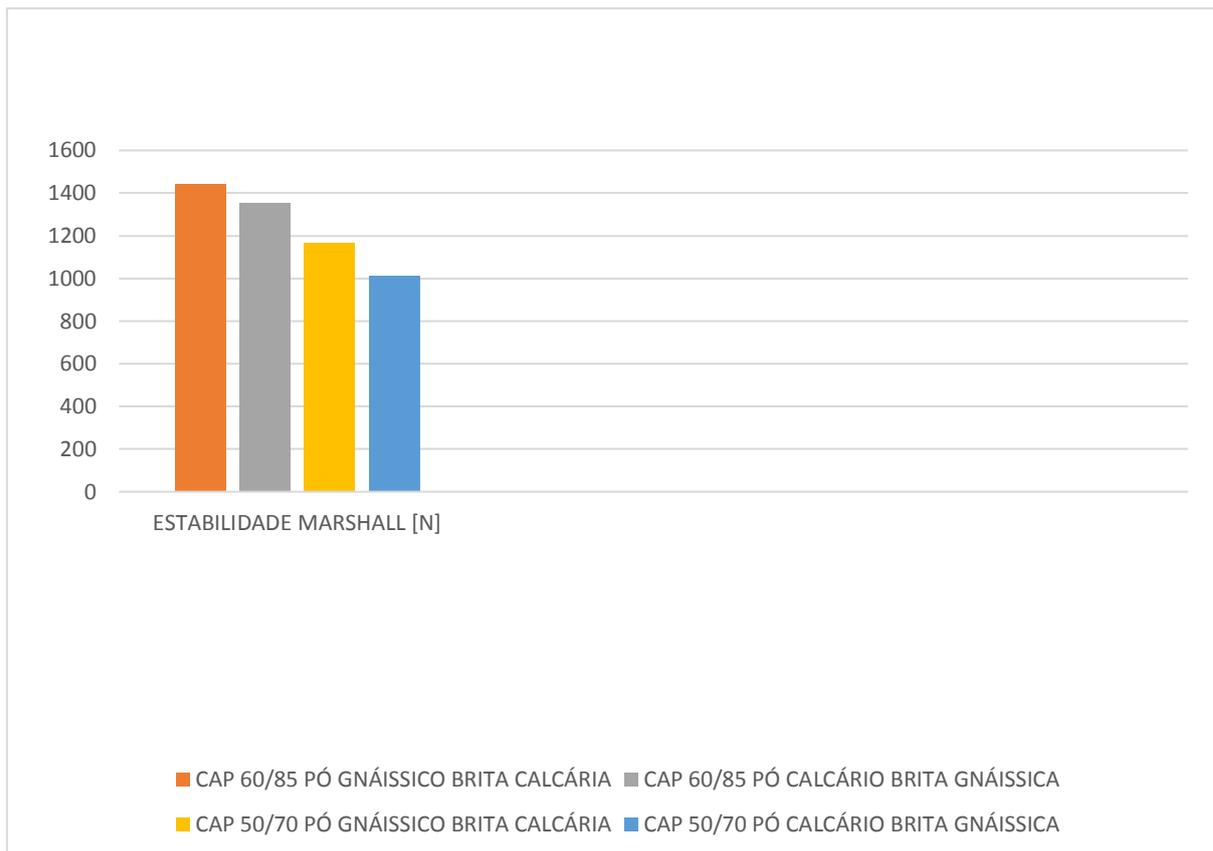
Tabela 14 - Média dos resultados da estabilidade obtidos no ensaio Marshall comparando agregados

ESTABILIDADE MARSHALL				
	PÓ GNAISSICA BRITA CALCÁRIA	PÓ CALCARIO BRITA GNÁISSICA	PÓ GNÁISSICA BRITA CALCÁRIA	PÓ CALCÁRIO BRITA GNÁISSICA
	CAP 60/85	CAP 60/85	CAP 50/70	CAP 50/70
ESTABILIDAD E [N]	1441,37	1352,40	1166,10	1011,03

Fonte: Autor 2018

De acordo com a tabela 14, as leituras médias de estabilidade obtidas no ensaio Marshall foram de 1441,37 N para o traço pó gnáissico e brita calcária e 1352,40 N para o traço pó calcário e brita gnáissica, ambos com CAP 60/85. Obteve-se a leituras médias de 1166,10 N para o traço pó gnáissico e brita calcária e 1011,03 N para o traço pó calcário e brita gnáissica, ambos com CAP 50/70.

Gráfico 6 - Média dos resultados de estabilidade obtidos no ensaio Marshall comparando agregados



Fonte: Autor 2018

Após a análise do gráfico, percebe-se a diferença de valores de estabilidade Marshall entre os diferentes traços, podendo ressaltar que os traços de CAP 60/85 contendo agregados pó gnáissico e brita calcária possuem um aumento de 6,57 % em relação aos mesmos traços contendo agregados pó calcário e brita gnáissica, e que os traços de CAP 50/70 contendo agregados pó gnáissico e brita calcária possuem um aumento de 15,33 % em relação aos mesmos traços contendo agregados pó calcário e brita gnáissica, sendo assim os traços contendo agregados pó gnáissico e brita calcária são mais resistentes. Observa-se também que o traço de agregados pó gnáissico e brita calcária com CAP 60/85, possui o maior valor de estabilidade Marshall, sendo assim o mais resistente dentro dos quatro analisados.

6.4.3 FLUÊNCIA

Nesta relação foram extraídos dados de estabilidade das TAB. 6, TAB. 7, TAB. 8 e TAB. 9, que resultaram na TAB. 15 e GRAF. 7 que são comparativos.

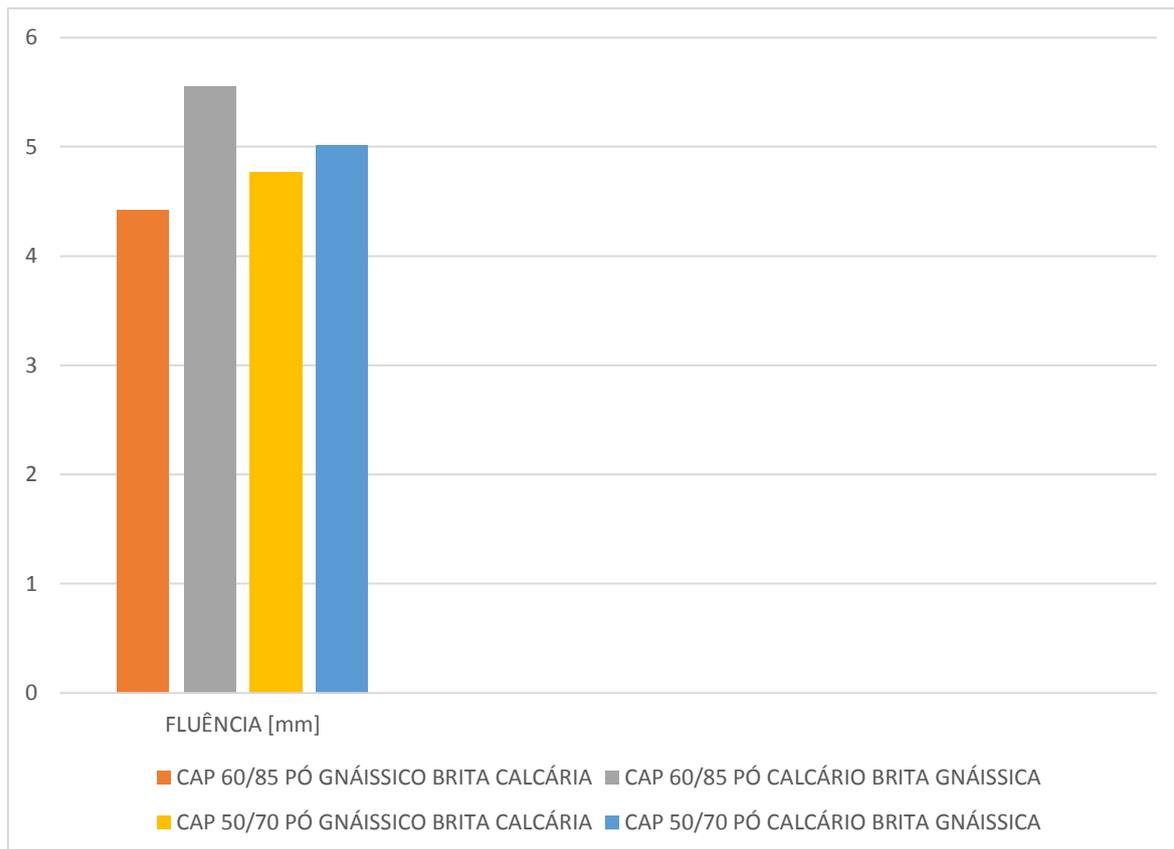
Tabela 15 - Média dos resultados da fluência obtidos no ensaio Marshall comparando agregados

FLUÊNCIA				
	PÓ GNAISSICO BRITA CALCÁRIA CAP 60/85	PÓ CALCARIO BRITA GNÁISSICA CAP 60/85	PÓ GNÁISSICO BRITA CALCÁRIA CAP 50/70	PÓ CALCÁRIO BRITA GNÁISSICA CAP 50/70
FLUÊNCIA [mm]	4,42	5,56	4,77	5,01

Fonte: Autor 2018

De acordo com a tabela 15, as leituras médias de fluência obtidas no ensaio Marshall foram de 4,42 mm para o traço pó gnáissico e brita calcária e 5,56 mm para o traço pó calcário e brita gnáissica, ambos com CAP 60/85. Obteve-se as leituras médias de 4,77 mm para o traço pó gnáissico e brita calcária e 5,01 mm para o traço pó calcário e brita gnáissica, ambos com CAP 50/70.

Gráfico 7 - Média dos resultados de fluência obtidos no ensaio Marshall comparando agregados



Fonte: Autor 2018

Após a análise do gráfico, percebe-se a diferença de valores de fluência entre os diferentes traços, podendo ressaltar que os traços de CAP 60/85 contendo agregados pó calcário e brita gnáissica possuem um aumento de 25,79 % em relação aos mesmos traços contendo agregados pó gnáissico e brita calcária, e que os traços de CAP 50/70 contendo agregados pó calcário e brita gnáissica possuem um aumento de 5,03 % em relação aos mesmos traços contendo agregados pó gnáissico e brita calcária, sendo assim os traços contendo agregados pó calcário e brita gnáissica possuem valores mais altos de fluência sendo assim considerados mais plásticos e com deformações mais permanentes. Observa-se também que o traço de agregados pó calcário e brita gnáissica com CAP 60/85, possui o maior valor de fluência, sendo assim o mais plástico e com deformação mais permanente dentro dos quatro analisados.

7 CONCLUSÃO

Após a realização deste estudo detalhado de diferentes traços de CBUQ, conclui-se que parâmetros principais como vazios cheios de betume, estabilidade e fluência, variam significativamente alterando se origem dos agregados misturados entre gnáissicos e calcários, e composição do CAP entre polimérico ou não.

O parâmetro de vazios cheios de betume com valores mais altos, indicam uma massa com menos entrada para agentes intempéricos como ar e água que degradam o betume, sendo assim uma massa mais impermeável, com mais flexibilidade, e o mais importante, uma massa com um teor de betume mais alto, mas longe da exsudação, visto que o aumento da porcentagem de vazios cheios de betume está ligado diretamente a relação betume vazios dentro da faixa. O parâmetro estabilidade com valores mais altos indicam uma massa mais resistente, estável e durável, já o de fluência atua ao contrário, onde valores mais baixos indicam uma massa com uma fase elástica maior, ou seja, uma maior capacidade de voltar ao seu estado inicial após sofrer uma deformação.

No comparativo entre CAPs, os traços contendo agregados pó gnáissico e brita calcária com CAP 60/85, que possui como principal diferença a adição de polímero SBS, obtiveram valores de 11,61% e 23,60%, maiores nos parâmetros de vazios cheios de betume e estabilidade em relação ao mesmo traço contendo CAP 50/70 que é um CAP convencional, já no parâmetro de fluência ocorreu ao contrário, onde o traço com CAP 50/70 obteve 7,91% a mais do que o traço com CAP 60/85. Nos traços contendo agregados pó calcário e brita gnáissica com CAP 60/85, foram obtidos os valores de 33,76% e 10,97% maiores nos parâmetros de estabilidade e fluência em relação ao mesmo traço contendo CAP 50/70, já no parâmetro de vazios cheios de betume ocorreu ao contrário, onde o traço com CAP 50/70 obteve 0,17% a mais do que o traço com CAP 60/85.

No comparativo entre agregados, os traços contendo CAP 60/85 com agregados pó gnáissico e brita calcária, obtiveram valores de 1,13% e 6,57%, maiores nos parâmetros de vazios cheios de betume e estabilidade em relação ao mesmo traço contendo agregados pó calcário e brita gnáissica, já no parâmetro de fluência ocorreu ao contrário, onde o traço com pó calcário e brita gnáissica obteve 25,79% a mais do que o traço com pó gnáissico e brita calcária. Nos traços contendo CAP 50/70 com agregados pó gnáissico e brita calcária, foram obtidos valores de 0,086% e 15,33%, maiores nos parâmetros de vazios cheios de betume e estabilidade em relação ao mesmo traço contendo agregados pó calcário e brita gnáissica, já no parâmetro de fluência ocorreu ao contrário, onde o traço com pó calcário e brita gnáissica obteve 5,03% a mais do que o traço com pó gnáissico e brita calcária.

Ao final, pode se chegar à conclusão que a mistura pó gnáissico e brita calcária com CAP 60/85 é considerada superior no quesito qualidade, pois possui

os maiores valores de vazios cheios de betume e estabilidade, sendo eles, 11,61% e 1441,37N respectivamente, e o menor valor de fluência, sendo ele de 4,42mm.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

_____.DNER – EM 129/2011: Cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero elastomérico – Especificação de material. P. 01/04.

_____.DNER – EM 396/99: Cimento asfáltico modificado por polímero - Especificação de material. P. 01/04.

_____.DNER – ME 043/95: Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall – Método de ensaio. P. 01/11.

_____.DNER – ME 083/98: Agregados – análise granulométrica – Método de ensaio. P. 01/05.

_____.DNER – PRO 120/97: Coleta de amostras de agregados – Procedimento. P 01/05.

_____.DNIT 031/2006 – ES: Pavimentos flexíveis - Concreto Asfáltico - Especificação de serviço. P 01/14.

_____.DNIT 095/2006 – EM: Cimentos asfálticos de petróleo - Especificação de material. P 01/06.

BALBO, J.T. **Pavimentação asfáltica**: materiais, projetos e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BAUER, L.A.F. (Coord.). **Materiais de construção 1**. 5. ed. rev. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

BERNUCCI, L.B. et al. **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros, 1. ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2008.

FARIA, HENRIQUE BARBOSA. **Análise do comportamento do CBUQ com diferentes agregados combinados ao cimento asfáltico convencional e polimérico**. 2015. 44 p. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Civil) – Centro Universitário de Formiga – UNIFOR-MG, Formiga, 2015

MANUAL BÁSICO DE EMULSÕES ASFÁLTICAS. 2. ed. rev. amp. Rio de Janeiro: ABEDA, 2010.

PESQUISA CNT DE RODOVIAS 2017: RELATÓRIO GERENCIAL. Brasília: CNT: SEST: SENAT, 2017.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**: volume 1, 2. ed. ampl. São Paulo: Pini, 2007.

