

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO MATERIAL FRESADO NA COMPOSIÇÃO DO CBUQ

Aline Jéssica Aquino Brito

*Discente do Curso de Engenharia Civil da UniEVANGÉLICA - Centro Universitário de Anápolis
(alinejessika@hotmail.com)*

Ana Lúcia Carrijo Adorno

Professora Doutora do Curso de Engenharia Civil da UniEVANGÉLICA - Centro Universitário de Anápolis (ana.carrijo@unievangelica.edu.br)

Isa Lorena Silva Barbosa

*Professora Mestra do Curso de Engenharia Civil da UniEVANGÉLICA - Centro Universitário de Anápolis
(isa_barbosa@hotmail.com)*

RESUMO

O presente estudo teve como finalidade a análise comparativa do Concreto Betuminoso Usinado a Quente com adição de material fresado. O material fresado é obtido através da fresagem que é uma técnica constantemente utilizada para processo de manutenção e restauração de rodovias, pois possibilita intervenções apenas nos locais onde necessitam de restaurações, podendo solucionar problemas como: elevação, rebaixamento ou manutenção no greide original da pista; inclinação da pista com relação aos dispositivos de drenagem superficial; propagação de trincas, entre outros. Geralmente o material resultante da fresagem é descartado, se tornando um dos maiores poluentes na manutenção das vias, por conter o cimento asfáltico de petróleo. O objetivo deste trabalho foi a análise da composição do concreto betuminoso usinado a quente comumente fabricado no país seguindo as normas específicas e a análise de diferentes porcentagens de substituição dos agregados pelo uso do material fresado na composição do CBUQ, faixa C do DNIT. Essa análise foi realizada em laboratório, seguindo as diretrizes do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte. A metodologia utilizada neste trabalho foi através de análises teóricas e experimentais, estudo de caso e dosagem da mistura asfáltica pelo método Marshall, ensaio mais utilizado no Brasil. Como resultado obteve-se que a substituição de até 15% de material fresado na composição do CBUQ apresenta resultados dentro dos parâmetros especificados por norma, podendo ser utilizado na pavimentação diminuindo o custo e o impacto causado por esse material no meio ambiente.

PALAVRAS-CHAVE: Pavimentação. Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ). Material Fresado. Ensaio Dnit.

1 INTRODUÇÃO

Quando se trata da história da pavimentação podemos dizer que ela está diretamente ligada à história da humanidade. A pavimentação foi de extrema importância para o povoamento dos continentes, as conquistas territoriais e o intercâmbio comercial, cultural e religioso entre os povos da antiguidade (BERNUCCI et al., 2008).

Semelhante aos dias de hoje as estradas romanas eram compostas por fundação e uma camada de superfície que variavam de acordo com a matéria prima disponível e com a qualidade do terreno natural (BERNUCCI et al., 2008).

No Brasil, uma das primeiras estradas que se tem registro foi construída em 1560, se tratava de um caminho aberto para ligar São Vicente ao Planalto Piratininga em São Paulo. Durante o Império o investimento no transporte rodoviário foi bem escasso. Ainda no século XX havia poucos quilômetros de estradas no Brasil, e o tráfego era restrito a veículos de tração animal (PREGO, 2001 apud, BERNUCCI et al., 2008).

O asfalto é um dos mais antigos e versáteis materiais de construção utilizado pelo homem. Dentre as mais de 100 principais aplicações, o uso na pavimentação é uma das mais antigas e mais utilizadas.

A pavimentação é um processo composto por várias camadas, sendo o revestimento a camada superficial que se destina a receber a carga dos veículos e diretamente a ação climática. Dessa forma, o revestimento deve garantir a impermeabilidade, flexibilidade, durabilidade, resistência à derrapagem, entre outros, de acordo com o tráfego e o clima do local onde será construído.

O tipo de revestimento que será tratado aqui é o fabricado em usina específica fixa a quente com uso de CAP, também conhecido como concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ). Esse revestimento é o mais empregado no Brasil e se trata do produto da mistura proporcionada de agregados de inúmeros tamanhos e cimento asfáltico, ambos aquecidos a temperaturas previamente determinadas em função da característica viscosidade-temperatura do ligante.

2 CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE

2.1 HISTÓRICO

No Egito, uma das primeiras estradas pavimentadas não se destinaram a veículos com rodas, mas a trenós para o transporte de cargas. Durante a construção das pirâmides as vias eram feitas com lajões justapostos em base com boa capacidade de suporte. Muitas das estradas que foram construídas antigamente se transformaram em estradas asfaltadas na modernidade. Já havia o entendimento, na época áurea de Otávio Augusto em Roma, de que as rodovias faziam parte de sociedades desenvolvidas, sofriam degradação ao longo dos anos e sua manutenção era inevitável (BALBO, 2007).

Já na América Latina, as vias construídas pelos incas foram qualificadas pelo cientista e viajante Alexander Von Humboldt como “os mais úteis e estupendos trabalhos realizados pelo homem”. O sistema de estradas construídas pela avançada civilização inca abrangia terras hoje da Colômbia até o Chile e a Argentina, cobrindo a região árida do litoral, florestas, até grandes altitudes da Cordilheira dos Andes (BERNUCCI et al., 2007).

Em conformidade com Bernucci (2007), no Brasil uma das primeiras estradas que se tem registro foi construída em 1560, se tratava de um caminho aberto para ligar São Vicente ao Planalto Piratininga em São Paulo. O governo da Capitania de São Vicente recuperou esse caminho em 1661, o transformando em Estrada do Mar e permitindo o

tráfego de veículos. Atualmente a estrada também é conhecida como Estrada Velha do Mar.

2.2 DEFINIÇÕES

A pavimentação é uma estrutura construída sobre a superfície final da terraplanagem, destinada a receber a carga dos veículos e a ação climática diretamente na camada superficial, conhecida como revestimento. Por sua vez, o revestimento deve garantir a impermeabilidade, conforto, economia e segurança. O pavimento é um arranjo composto por múltiplas camadas de espessuras finitas e pode ser classificado em basicamente três tipos de pavimentos: rígidos, semirrígidos e flexíveis. Os vários tipos de pavimentos diferem entre si, essencialmente, na sua composição e no modo de funcionamento (GOMES, 2015).

De acordo com o Manual de Pavimentação IPR – 719 (DNIT, 2006) o tipo de pavimento mais utilizado no Brasil é o flexível, que é formado por uma mistura sobretudo de agregados e ligantes asfálticos. Todas as camadas deste pavimento sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas. Esse modelo de pavimentação é composto por quatro camadas principais, sendo elas: reforço do subleito, sub-base, base e revestimento asfáltico. De acordo com o tráfego e materiais disponíveis, as camadas podem sofrer alteração. O revestimento asfáltico pode ser formado por camada de rolamento e por camadas intermediárias ou de ligação.

O CBUQ é o concreto betuminoso usinado a quente que provém de uma mistura de agregados (miúdo e graúdo), material de enchimento (Filler-cimento ou pó de calcário) e ligante (CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo). Essa mistura entre agregados e ligante é feita antes da compressão em uma usina de asfalto e é realizada em altas temperaturas, logo após é transportada por caminhões basculantes até o local onde será aplicado (BERNUCCI et al., 2008).

Os agregados utilizados para compor o CBUQ podem ter porcentagens substituídas por outros materiais, aumentando a resistência, diminuindo o custo, preservando o meio ambiente e não afetando a qualidade final do revestimento. Um dos possíveis substitutos é o material fresado que resulta da fresagem que consiste na remoção da camada superficial do pavimento já existente (BERNUCCI et al., 2008).

Geralmente o material resultante da fresagem é descartado, se tornando um dos maiores poluentes na manutenção das vias, por conter o cimento asfáltico de petróleo – CAP. Esse material pode ser reutilizado em várias camadas da terraplanagem e da pavimentação, entre elas: base e/ou sub-base, camada de rolamento ou substituição na porcentagem de agregados utilizados no CBUQ. A reutilização do material fresado produz benéficamente uma redução no impacto causado ao meio ambiente, pois permite a preservação das jazidas locais e garante uma melhor qualidade de vida tanto para geração atual quanto para gerações futuras.

2.3 FRESAGEM A FRIO

Segundo a norma ES 159 (DNIT, 2011), fresagem a frio é definida como uma técnica de reciclagem de pavimentos que provoca a retirada da camada asfáltica superficial através do corte, podendo ser feito por processo mecânico a quente ou a frio. Esse processo ocorre quando o revestimento apresenta defeitos significativos que não podem ser recuperados com restaurações locais.

Para execução da fresagem a frio, o desbastamento ocorre de maneira abrasiva na superfície e em temperatura ambiente, com espessura previamente determinada, por intermédio das lâminas de corte da máquina fresadora.

2.4 INTERFERÊNCIAS COM O MEIO AMBIENTE

Segundo o Manual de Pavimentação IPR – 719 (DNIT, 2006) o impacto ambiental é definido como qualquer alteração significativa causada pela ação humana em um ou mais componentes do meio ambiente. Entende-se por meio ambiente o espaço onde são desenvolvidas as atividades humanas e a vida dos animais e vegetais – envolvendo, assim, todo o conjunto de condições, leis, influências e interações de ordem física, química e biológica, que permite abrigar e reger a vida em todas as suas formas.

Degradação ambiental ou poluição é qualquer alteração das qualidades físicas, químicas ou biológicas do meio ambiente que possam:

- Prejudicar a saúde ou o bem estar da população;
- Criar condições adversas às atividades sociais e econômicas;
- Ocasionar danos relevantes à flora, à fauna e a qualquer recurso natural;
- Ocasionar danos relevantes aos acervos histórico, cultural e paisagístico.

As obras rodoviárias tem significativa contribuição na geração de Resíduos Asfálticos de Pavimentação (RAP) , pois está fortemente ligada ao desenvolvimento econômico e integração nacional através do setor de transporte (SCHNEIDER et al., 2015). Embora seja responsável pela ligação de zonas produtoras e consumidoras, o setor rodoviário possui forte potencial na geração de resíduos, uma vez que as rodovias brasileiras são projetadas e implantadas sem ênfase nas questões ambientais em todas as suas fases (SCHNEIDER et al., 2015).

3 ENSAIOS, NORMAS E RESULTADOS

Para fazer a análise comparativa entre o CBUQ comum e o CBUQ com adição de material fresado é necessário submeter todos os materiais que serão utilizados a testes tecnológicos e emitir relatórios que atestem a qualidade e as características adequadas de cada tipo de Concreto Betuminoso Usinado à Quente. No Brasil atualmente, seguem-se os parâmetros dos métodos de ensaio e procedimentos disponibilizados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte, já que este departamento é responsável pela parametrização e fiscalização das estradas de tráfego. A seguir serão apresentados as diretrizes aplicadas no traço de asfalto e seus componentes, conforme indicados pelo DNIT:

3.1 COLETA E ORIGEM DAS AMOSTRAS

As amostras de brita 1, brita 0 e pó de brita foram coletadas na Pedreira Anápolis, no dia 21 de fevereiro de 2019 às 13:00hrs e se deu conforme a norma de Procedimento 120 (DNIT, 1997). A norma determina que, para o agregado graúdo seja coletado uma amostra de 50kg e para o agregado miúdo a amostra seja de 20kg. As amostras foram utilizadas para os ensaios de caracterização como granulometria, los angeles, índice de forma, massa específica e equivalente de areia.

A amostra do material fresado foi colhida na sede do DNIT em Anápolis, no dia 28 de março de 2019, e como não existe norma para coleta desse tipo de material, foi seguido a norma de Procedimento 120 (DNIT, 1997), coletando 50kg de amostra.

Os ensaios foram executados com materiais obtidos dentro das recomendações do DNIT, para composição de mistura Marshall para concreto asfáltico camada de rolamento, conforme diretrizes preconizadas pela norma ES 031 – Especificação de Serviço (DNIT, 2006b). Por motivos de disponibilidade de materiais, o pó de brita foi utilizado como filler (amostra de 20 kg). Depois de tomadas as quantidades requeridas conforme a norma, as

amostras foram levadas ao laboratório e, após serem submetidas a um quarteamento, cada amostra foi reduzida para o tamanho apropriado aos ensaios específicos.

O Cimento Asfáltico de Petróleo que foi cedido pela empresa Engetec Controle Tecnológico Ltda é do tipo 50/70, e não possui aditivo em sua composição.

3.2 ESTUDO DE CASO

Os ensaios foram feitos no laboratório Engetec Controle Tecnológico Ltda, que fica localizado em Anápolis-Go. O laboratório forneceu todos os equipamentos necessários para realização dos ensaios que foram feitos sob supervisão de três engenheiros civis acompanhando todos os ensaios em momento integral.

3.3 MÉTODO DE ENSAIO 035 (DNER, 1998) – AGREGADOS – DETERMINAÇÃO DA ABRASÃO “LOS ANGELES”

A resistência ao desgaste está inteiramente ligada à ação do tráfego (PINTO, 2018. reimp) e é avaliada pelo ensaio de abrasão “Los Angeles”. Esse método determina o desgaste sofrido pelo agregado, quando colocado na máquina “Los Angeles” juntamente com uma carga abrasiva, submetido a um determinado número de revoluções desta máquina à uma velocidade de 30 rpm a 33rpm. Segundo a norma, é permitido a utilização do agregado que obtiver um desgaste de até 40%.

Quanto à execução do ensaio, ocorre da seguinte forma: O agregado utilizado pode ser a pedra britada, o pedrisco ou o pedregulho. Após fixar a granulometria (faixa do DNIT), o material é lavado e seco em estufa, com a temperatura em torno de 105°C e permanece na estufa até atingir peso constante. Depois de seco é peneirado e dividido em porções conforme as amostras passadas na peneira para fornecer a graduação do material, afim de definir a quantidade e o peso das esferas. Então é determinada a massa seca das porções (mn) antes do ensaio. A carga abrasiva deve ser aplicada conforme a norma ME 035 – Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles” (DNER, 1998).

Em seguida deve-se averiguar a limpeza do tambor, girar as amostras com as esferas (carga abrasiva) com velocidade de 30 a 33 RPM até completar 500 rotações, retirar todo o material do tambor e guardar as esferas separadamente. As esferas devem ser limpas com escova. A amostra então deve ser passada na peneira de 1,7 mm, ser lavada e seca a temperatura em torno de 105°C, por 3 horas. Verifica-se a massa da amostra lavada e seca (Mn).

Quanto aos resultados, a abrasão é determinada pela fórmula:

$$An = \frac{mn - Mn}{Mn} \times 100 \quad (1)$$

Em que:

An = Abrasão “Los Angeles” (com aproximação de 1%);

n = graduação (A, B, C, D, E, F ou G);

mn = massa seca da amostra antes do ensaio;

Mn = massa seca da amostra após o ensaio.

A abrasão encontrada para brita 1 foi de 23,5% e para brita 0 foi 17,8% e de acordo com a NBR 12948 – Ensaio de Abrasão Los Angeles (ABNT,1993), o índice de desgaste por abrasão deve ser inferior a 40% em massa do material para uso em Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ). O índice obtido também atende ao disposto na ES 031 (DNIT, 2006b).

3.4 MÉTODO DE ENSAIO 053 (DNER, 1994) – MISTURAS BETUMINOSAS – PORCENTAGEM DE BETUME

O ensaio resulta da seguinte forma: A mistura betuminosa deverá descansar por 1 hora em temperatura de 120°C e logo após será desmanchada para obter-se uma amostra com cerca de 1 kg. Então é colocada em um prato, coberto com um filtro de papel e depositado dentro do centrifugador e este é tampado seguramente. Será colocado então 150 ml de solvente no prato e a amostra é deixada para descansar por 15 minutos, então se ativa o dispositivo centrifugador. A velocidade é aumentada de forma crescente até que a solução de betume venha a diluir-se. Quando a primeira porção de solvente acabar, o aparelho é parado e acrescenta-se uma nova porção. Este procedimento deve ser repetido até o solvente começar a sair claro. Quando esta situação for atingida, toda a amostra deverá ser guardada na estufa até atingir peso constante. Depois de seco a amostra será pesada novamente e assim é obtido o valor do peso de betume extraído. A porcentagem de betume é dada por:

$$P = \frac{\text{Massa inicial} - \text{massa final}}{\text{Peso total da amostra}} \times 100 \quad (2)$$

3.5 MÉTODO DE ENSAIO 054 (DNER, 1997) – EQUIVALENTE DE AREIA

O ensaio ocorre da seguinte forma: A amostra é obtida através do material que passa na peneira de 4,8mm, que deve ser umedecida antes do peneiramento e unida com o agregado graúdo que apresenta finos aderentes.

De acordo com as especificações da norma, após ser acionado o sifão através de um pequeno tubo, a pinça aberta é assoprada no topo do garrafão, onde a solução está contida e observa-se o escoamento durante o fechamento da pinça.

Então, deve-se transferir a solução de trabalho para proveta, até que o menisco de 10 cm seja atingido e, com o auxílio de um funil, deve-se transferir também o conteúdo de um recipiente de medida cheio de amostra preparada e rasada na superfície;

Após o período de 10 minutos, a proveta é tampada com a rolha de borracha e agitada vigorosamente, num movimento alternado, horizontalmente. Executam-se 90 ciclos em aproximadamente 30 segundos, então é retirada a rolha e introduzido o tubo lavador e repousado por 20 minutos sem perturbação;

Após período de 20 minutos, é determinado o nível superior da suspensão argilosa, efetuando a leitura com precisão de 2 mm; então o pistão é introduzido cuidadosamente na proveta até assentar completamente na areia. Gira-se a haste ligeiramente, sem empurrá-la para baixo, até que um dos parafusos de ajustagem se torne visível, fixando-o à haste. Determina-se o nível do centro de um dos parafusos de ajustagem e adota-o como leitura correspondente ao nível superior da areia. Este nível pode ser determinado medindo-se a distância entre o topo do disco que se apoia na boca da proveta e a base inferior do peso cilíndrico, e subtraindo-se desta, a mesma distância, medida quando a sapata está assentada no fundo da proveta. Com os dados obtidos, calcula-se o equivalente de areia da seguinte forma:

$$EA = \frac{\text{Leitura no topo da areia}}{\text{Leitura no topo da argila}} \times 100 \quad (3)$$

O resultado do ensaio é apresentado na forma de média aritmética das repetições do ensaio com a mesma amostra.

Os resultados obtidos estão descritos na tabela 1.

Tabela 1 - Equivalente de areia

	Leitura no topo da areia	Leitura no topo da argila	Resultado	Média
Equivalente de areia (1)	11,0	15,5	71,0%	70,3%
Equivalente de areia (2)	10,8	15,5	69,7%	

Fonte: Autoras.

Segundo a norma ES 031 (DNIT, 2006b), o equivalente de areia deve ser igual ou superior a 55%, portanto o agregado atende às especificações pois o resultado obtido foi 70%.

3.6 MÉTODO DE ENSAIO 078 (DNER, 1994) – AGREGADO GRAÚDO – ADESIVIDADE A LIGANTE BETUMINOSO

Essa norma contém um método para determinar a propriedade do agregado de ser aderido pelo material betuminoso, verificando assim a adesividade do agregado graúdo ao ligante betuminoso. O ensaio procede-se da seguinte forma: a amostra de agregado com massa de 500 g é lavada e imersa em água destilada por 1 minuto e logo após descansa em estufa por 2 horas com temperatura em torno de 120°C. O ligante betuminoso também deve estar nessa temperatura, caso seja cimento asfáltico. Para de fato realizar o ensaio, a amostra deve estar a 100°C e é envolvida pelo ligante betuminoso por uma espátula que após secar/curar é colocada em um vidro, imersa em água destilada e descansa por 72h a 40°C. O resultado é aceitável caso não haja nenhum descolamento da película betuminosa no tempo de descanso.

O resultado deste ensaio é totalmente visual e após 72 horas de repouso imerso em água destilada, na estufa a 40°C, foi constatado que não houve nenhum deslocamento da película betuminosa, obtendo resultado satisfatório. Os ensaios já realizados na empresa Engetec verificaram que essa proporção é a ideal para o agregado da região, e foi obtido por tentativas anteriores.

3.7 MÉTODO DE ENSAIO 083 (DNER, 1998) – AGREGADOS – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

As amostras são divididas em porções de 1kg que em seguida são levadas à estufa e secas a temperatura em torno de 110°C e são esfriadas a temperatura ambiente afim de se determinar a massa total. Após o esfriamento as amostras passam por peneiramento mecânico ou manual e são pesadas, considerando o material pulverulento e o que tenha ficado preso nas malhas, o material retido em cada peneira.

Para o resultado é necessário calcular a porcentagem de material passando em cada peneira e a porcentagem acumulada de material seco em cada peneira. No final é possível determinar o módulo de finura e a classificação do agregado.

No ensaio de Brita 1 a amostra foi seca na estufa e em seguida colocada na peneira de 3/4" e agitada mecanicamente durante 10 minutos. Após a agitação, o material retido em cada peneira foi pesado e anotado na tabela 2.

Tabela 2 - Granulometria - Brita 1

Material:		Agregado Graúdo - Brita 1			
Peneiras		Análise Granulométrica			
Pol.	mm	Retido	% Retido	% Acumulado	% Passado

1"	25,4	0,0	0,0	0,0	100,0
3/4"	19,05	0,0	0,0	0,0	100,0
1/2"	12,5	574,77	57,4	57,4	42,6
3/8"	9,52	351,27	35,1	92,6	7,4
4	4,76	63,34	6,3	98,9	1,1
8	2,36	0,00	0,0	98,9	1,1
10	2,00	3,70	0,4	99,3	0,7
40	0,42	0,25	0,0	99,3	0,7
80	0,177	0,25	0,0	99,3	0,7
200	0,075	0,91	0,1	99,4	0,6
FUNDO		6,00	0,6	100,0	
TOTAL		1000,5			

Fonte: Autoras.

A partir dos dados anotados na tabela 2 foi feita a curva granulométrica da Brita 1 (figura 1).

Figura 1 - Curva granulométrica - Brita 1



Fonte: Autoras.

No ensaio com a Brita 0 o material foi seco em estufa e colocado na peneira de 1/2\". A amostra foi agitada manualmente. O material retido foi pesado e anotado na tabela 3.

A partir dos dados da Tabela 3 foi criada a curva granulométrica da Brita 0 (figura 2).

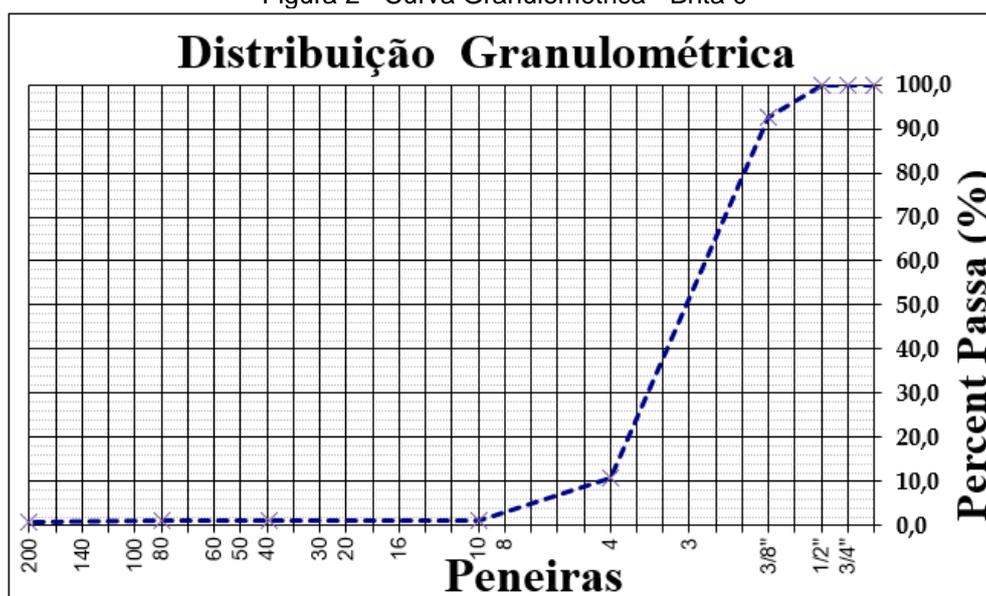
Tabela 3 - Granulometria - Brita 0

Material:		Brita 0			
Peneiras		Análise granulométrica			
Pol.	mm	Retido	% Retido	% Acumulado	% Passado
1"	25,4	0,0	0,0	0,0	100,0
3/4"	19,05	0,0	0,0	0,0	100,0

1/2"	12,5	0,0	0,0	0,0	100,0
3/8"	9,52	72,4	7,2	7,2	92,8
4	4,76	819,4	82,0	89,3	10,7
8	2,36	0,0	0,0	89,3	10,7
10	2,00	95,7	9,6	98,8	1,2
40	0,42	0,5	0,1	98,9	1,1
80	0,177	0,3	0,0	98,9	1,1
200	0,075	1,8	0,2	99,1	0,9
FUNDO		9,0	0,9	100,0	
TOTAL		999,0			

Fonte: Autoras.

Figura 2 - Curva Granulométrica - Brita 0



Fonte: Autoras.

Para o ensaio com o Pó de brita o material foi colocado na peneira de 3/8" e a amostra foi agitada manualmente. Os resultados estão anotados na tabela 4.

Tabela 4 - Granulometria - Pó de brita

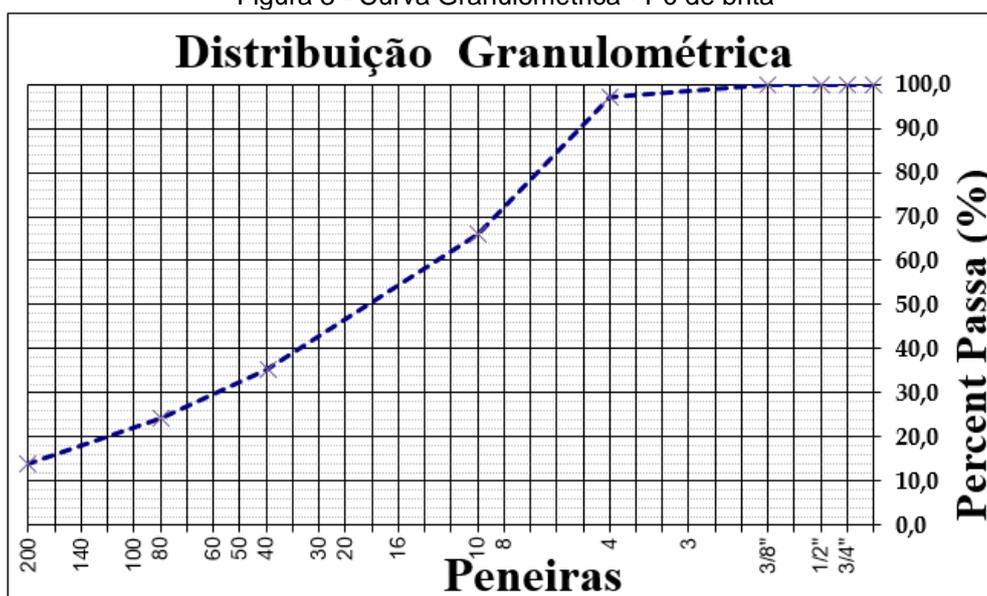
Material:		Pó de pedra			
Peneiras		Análise granulométrica			
Pol.	mm	Retido	% Retido	% Acumulado	% Passado
1"	25,4	0,0	0,0	0,0	100,0
3/4"	19,05	0,0	0,0	0,0	100,0
1/2"	12,5	0,0	0,0	0,0	100,0
3/8"	9,52	0,0	0,0	0,0	100,0
4	4,76	30,8	3,1	3,1	96,9

8	2,36	0,0	0,0	3,1	96,9
10	2,00	308,9	30,9	34,0	66,0
40	0,42	305,6	30,6	64,5	35,5
80	0,177	112,1	11,2	75,7	24,3
200	0,075	104,6	10,5	86,2	13,8
FUNDO		138,0	13,8	100,0	
TOTAL		1000,0			

Fonte: Autoras.

A figura 3 mostra a curva granulométrica formada a partir dos dados da tabela 4.

Figura 3 - Curva Granulométrica - Pó de brita



Fonte: Autoras.

O ensaio também foi realizado para determinar a granulometria do material fresado que foi adicionado ao CBUQ (tabela 5), obtendo os seguintes resultados:

Tabela 5 - Granulometria - Material Fresado

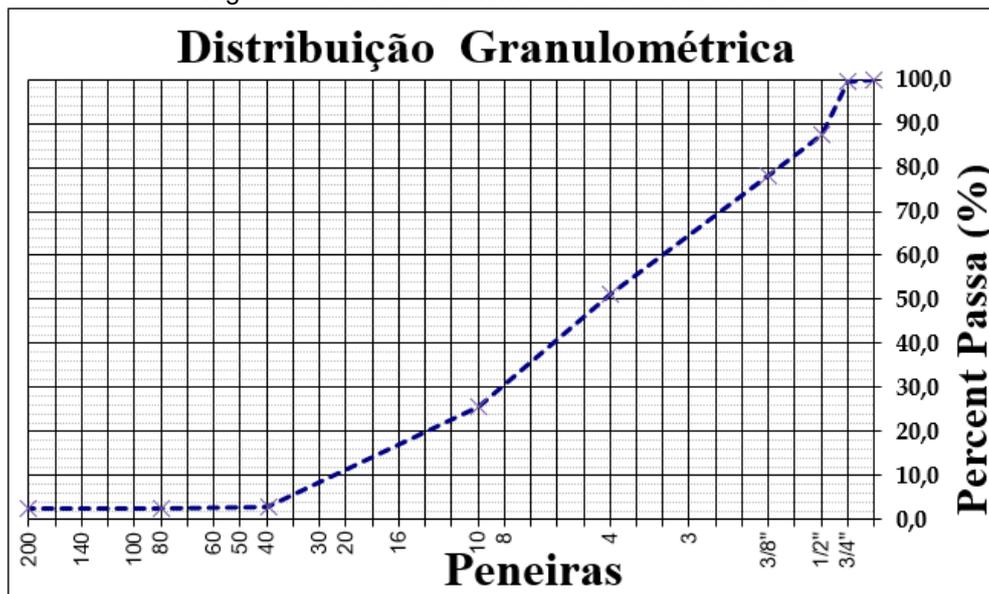
Material:		Fresado			
Peneiras		Análise granulométrica			
Pol.	mm	Retido	% Retido	% Acumulado	% Passado
1"	25,4	13,4	1,3	1,3	100,00
3/4"	19,05	18,6	1,9	0,5	99,48
1/2"	12,5	120,13	12,0	12,5	87,47
3/8"	9,52	93,17	9,3	21,8	78,15
4	4,76	269,58	27,0	48,8	51,19
8	2,36	0,00	0,0	48,8	51,19
10	2,00	254,13	25,4	74,2	25,78
40	0,42	227,25	22,7	96,9	3,05

80	0,177	3,28	0,3	97,3	2,72
200	0,075	0,35	0,0	97,3	2,69
FUNDO		0,00	0,0	97,3	
TOTAL		1000,0			

Fonte: Autoras.

A curva granulométrica (figura 4) do material fresado foi criada a partir dos dados obtidos na tabela 5.

Figura 4 - Curva Granulométrica - Material Fresado



Fonte: Autoras.

3.8 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE FORMA

É possível determinar o índice de forma tanto pelo Método de Ensaio 086 (DNIT, 1994), quanto pelo Método Paquímetro – NBR 7809 (ABNT, 2006).

Para a determinação do índice de forma foi utilizado o método da NBR7809 que é obtido pela utilização do paquímetro e realizado para agregados graúdos com dimensão maior que 9,5 mm. Para realização do ensaio é necessário o uso de paquímetro com resolução de 0,1 mm, devidamente aferido, uma estufa capaz de estabelecer sua temperatura entre $(105 \pm 5^\circ\text{C})$ e peneiras de ensaio das séries normal e intermediária. A preparação da amostra dá-se pela secagem na estufa e análise granulométrica, de forma que divida a amostragem em frações e seja desprezado todo o material passante na peneira de 9,5 mm e também aqueles que possuem massa inferior a 5% do que foi retido. Quanto ao procedimento experimental, cada fração obtida deve ser quantizada até o número de grãos obtidos, dado pela seguinte equação:

$$N_i = \frac{200}{\sum_{i=1}^n F_i} \quad (4)$$

Em que:

200 = Número de grãos a serem analisados;

N_i = Número de grãos a serem medidos na fração i ;

F_i = Porcentagem de massa retida na fração i ;

Após o cálculo de todas as frações, com o auxílio de um paquímetro, é necessário aferir o comprimento e espessura de cada um dos grãos. Para obtenção dos resultados deve-se calcular o índice de forma através da média ponderada da relação entre comprimento e espessura (c/e) de todos os grãos da fração.

O resultado encontrado para amostra ensaiada é indicado abaixo:

- Índice de forma = 0,64
- Classificação da forma = cúbica
- Origem: Pedreira Anápolis

3.9 CÁLCULO DA DOSAGEM

Dado o adicional positivo de aceitação dos componentes pelos ensaios executados, prossegue-se com a definição da dosagem do CBUQ comum inserindo os dados de granulometria conforme a tabela 6, para verificação dos limites da faixa escolhida.

Tabela 6 - Traço para CBUQ comum

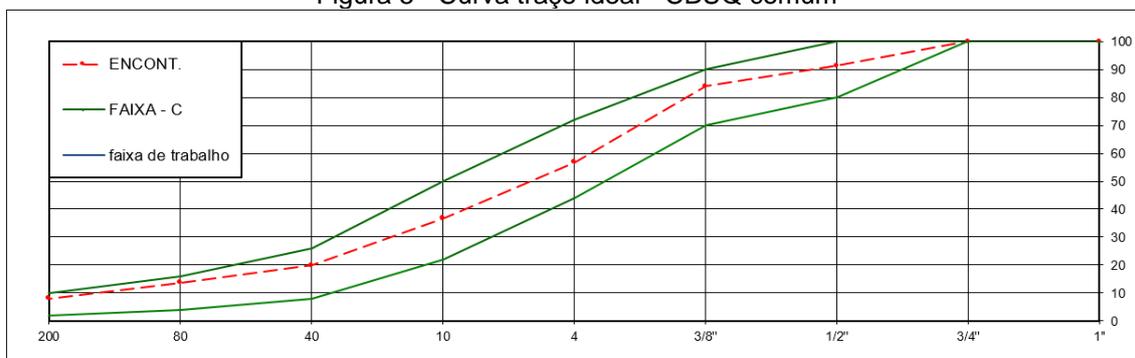
Cálculo do traço do CBUQ comum								
Peneiras		Brita 1	Brita 0	Pó de Pedra	Traço	Faixa média	Faixa C	
POL.	mm	15,0%	30,0%	55,0%			Mín.	Máx.
1"	25,40	15,00	30,00	55,00	100,0	100	100	100
3/4"	19,05	15,00	30,00	55,00	100,0	100	100	100
1/2"	12,70	6,38	30,00	55,00	91,4	90	80	100
3/8"	9,52	1,12	27,83	55,00	83,9	80	70	90
4	4,76	0,17	3,22	53,31	56,7	58	44	72
10	2,00	0,11	0,35	36,32	36,8	36	22	50
40	0,42	0,11	0,33	19,51	19,9	17	8	26
80	0,177	0,10	0,32	13,34	13,8	10	4	16
200	0,075	0,09	0,27	7,59	8,0	6	2	10
Fundo		Desprezado						

Fonte: Autoras.

A determinação das porcentagens a serem utilizadas, é obtida através de tentativas para alcançar o mais próximo da média dos limites da faixa. Por exemplo, quanto mais baixa a curva da granulometria estiver, mais "grosso" o agregado e a mistura estarão e, só será aceitável se permanecer dentro dos limites do DNIT. A figura 5 apresenta a curva considerada do traço ideal.

A partir do traço ideal do CBUQ comum, foi proposto a substituição de parte dos agregados pelo uso do material fresado. A tabela 7 indica o novo traço, utilizando 15% de material fresado na composição do CBUQ.

Figura 5 - Curva traço ideal - CBUQ comum



Fonte: Autoras.

Tabela 7 - Traço para CBUQ com 15% de material fresado

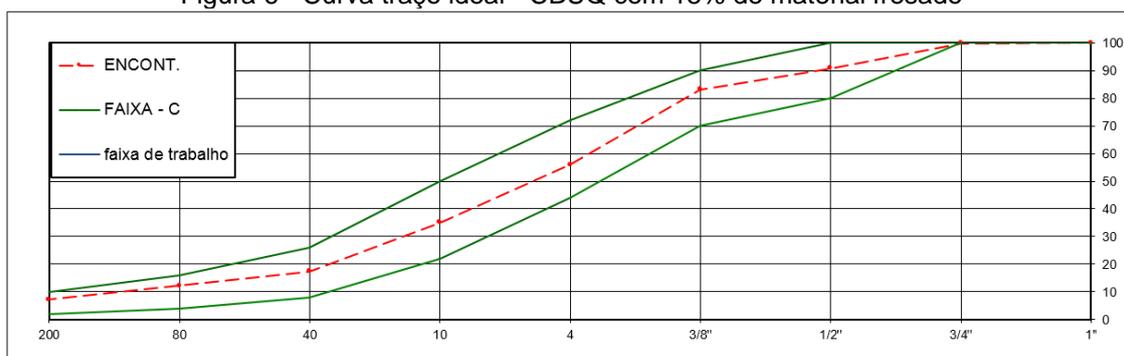
Cálculo do traço do CBUQ com com 15% de material fresado

Peneiras		Composição CBUQ comum	Material Fresado	Traço	Faixa média	Faixa C	
POL.	mm					Mín.	Máx.
		85,0%	15,0%				
1"	25,40	85,00	15,00	100,0	100	100	100
3/4"	19,05	85,00	14,92	99,9	100	100	100
1/2"	12,70	77,68	13,12	90,8	90	80	100
3/8"	9,52	71,35	11,72	83,1	80	70	90
4	4,76	48,19	7,98	55,9	58	44	72
10	2,00	31,26	3,87	35,1	36	22	50
40	0,42	16,96	0,46	17,4	17	8	26
80	0,177	11,71	0,42	12,1	10	4	16
200	0,075	6,76	0,40	7,2	6	2	10
Fundo		Desprezado					

Fonte: Autoras.

A curva média do DNIT para o CBUQ modificado com a substituição de 15% de material fresado é exemplificada na figura 6.

Figura 6 - Curva traço ideal - CBUQ com 15% de material fresado



Fonte: Autoras.

Foi realizado também o estudo para a substituição de 20% dos agregados por material fresado na composição do CBUQ comum. Desta forma, o traço está descrito na tabela 8.

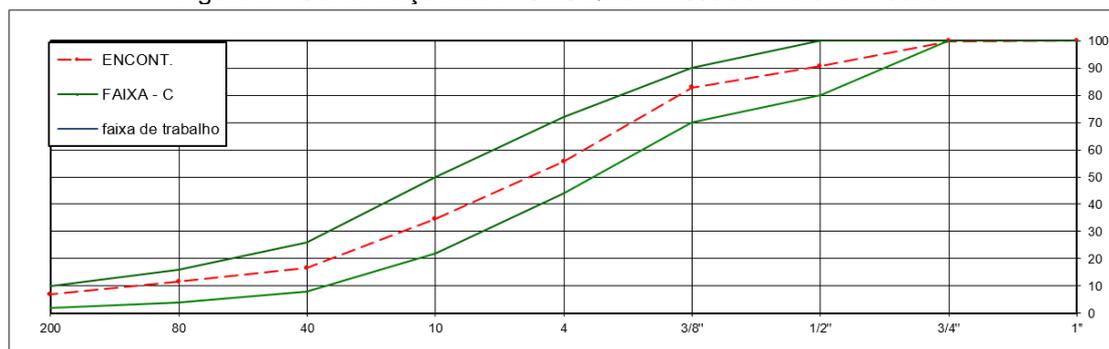
Tabela 8 - Traço para CBUQ com 20% de material fresado

Peneiras		Composição CBUQ comum	Material Fresado	Traço	Faixa média	Faixa C	
POL.	mm					Mín.	Máx.
		80,0%	20,0%				
1"	25,40	80,00	20,00	100,0	100	100	100
3/4"	19,05	80,00	19,90	99,9	100	100	100
1/2"	12,70	73,11	17,49	90,6	90	80	100
3/8"	9,52	67,15	15,63	82,8	80	70	90
4	4,76	45,36	10,24	55,6	58	44	72
10	2,00	29,42	5,16	34,6	36	22	50
40	0,42	15,96	0,61	16,6	17	8	26
80	0,177	11,02	0,54	11,6	10	4	16
200	0,075	6,36	0,54	6,9	6	2	10
Fundo		Desprezado					

Fonte: Autoras.

A curva do traço ideal utilizando 20% de material fresado na composição do CBUQ comum se dá conforme figura 7.

Figura 7 - Curva traço ideal - CBUQ com 20% de material fresado



Fonte: Autoras.

Também foi proposto a substituição de 30% de material fresado na composição do CBUQ, porém após várias análises foi constatado que o uso de 30% de material fresado produziria um CBUQ com muito material fino, o que resultaria num traço fora da faixa C do DNIT. Como solução foi sugerido a diminuição do uso de pó de pedra na composição, garantindo que o traço com 30% de material fresado encaixasse na faixa C do DNIT.

A tabela 9 indica o novo traço do CBUQ comum com uma redução do uso de pó de brita, aumentando, conseqüentemente, o uso de Brita 0.

Tabela 9 - Traço para CBUQ com redução de pó de brita

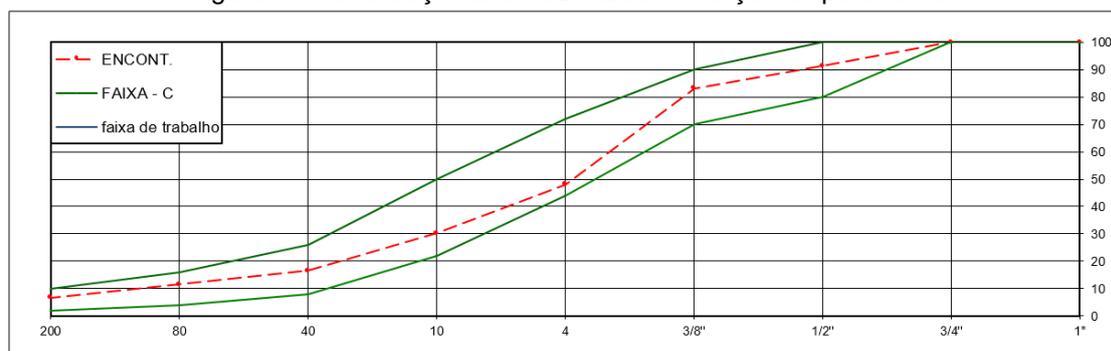
Cálculo do traço do CBUQ com redução de pó de brita

Peneiras		Brita 1	Brita 0	Pó de Pedra	Traço	Faixa média	Faixa C	
POL.	mm	15,0%	40,0%	45,0%			Mín.	Máx.
1"	25,40	15,00	40,00	45,00	100,0	100	100	100
3/4"	19,05	15,00	40,00	45,00	100,0	100	100	100
1/2"	12,70	6,38	40,00	45,00	91,4	90	80	100
3/8"	9,52	1,12	37,10	45,00	83,2	80	70	90
4	4,76	0,17	4,29	43,62	48,1	58	44	72
10	2,00	0,11	0,46	29,72	30,3	36	22	50
40	0,42	0,11	0,44	15,96	16,5	17	8	26
80	0,177	0,10	0,43	10,92	11,5	10	4	16
200	0,075	0,09	0,36	6,21	6,7	6	2	10
Fundo		Desprezado						

Fonte: Autoras.

A curva do traço ideal da nova composição com uma redução do pó de brita corresponde á figura 8.

Figura 8 - Curva traço ideal - CBUQ com redução de pó de brita



Fonte: Autoras.

Após a redução do pó de pedra no CBUQ comum, foi feito um novo traço substituindo 30% da composição de agregados pelo material fresado, formando um novo traço, conforme tabela 10.

Tabela 10 - Traço para CBUQ com 30% de material fresado

(continua)

Cálculo do traço do CBUQ com com 30% de material fresado

Peneiras		Composição CBUQ comum com redução do pó de pedra	Material Fresado	Traço	Faixa média	Faixa C	
POL.	mm	70,0%	30,0%			Mín.	Máx.
1"	25,40	70,00	30,00	100,0	100	100	100

Tabela 11 - Traço para CBUQ com 30% de material fresado

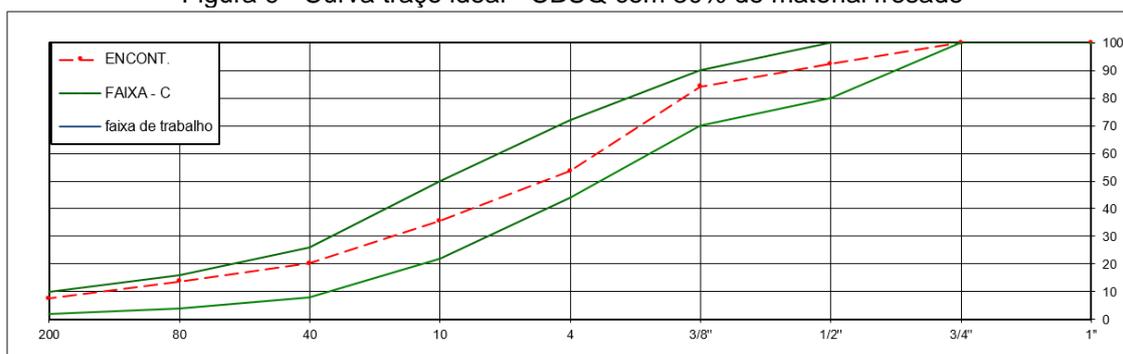
(conclusão)

Cálculo do traço do CBUQ com com 30% de material fresado								
Peneiras		Composição CBUQ comum com redução do pó de pedra	Material Fresado	Traço	Faixa média	Faixa C		
POL.	mm					Mín.	Máx.	
		70,0%	30,0%					
3/4"	19,05	70,00	30,00	100,0	100	100	100	
1/2"	12,70	63,97	28,36	92,3	90	80	100	
3/8"	9,52	58,25	25,96	84,2	80	70	90	
4	4,76	33,65	19,97	53,6	58	44	72	
10	2,00	21,20	14,43	35,6	36	22	50	
40	0,42	11,56	8,72	20,3	17	8	26	
80	0,177	8,02	5,60	13,6	10	4	16	
200	0,075	4,66	2,90	7,6	6	2	10	
Fundo		Desprezado						

Fonte: Autoras.

A curva do traço ideal, segundo as especificações do DNIT, para o CBUQ com substituição de 30% de material fresado se dá conforme a figura 9.

Figura 9 - Curva traço ideal - CBUQ com 30% de material fresado



Fonte: Autoras.

Calcula-se a quantidade necessária para montar um CP e a partir da dosagem da tabela, são calculados três traços para cinco variações de porcentagem de betume, afim de se determinar o teor ótimo para o projeto, ou seja, qual a porcentagem de CAP deve ser aplicada para o melhor desempenho de resistência e tração da massa asfáltica. Estipulou-se um valor inicial de 4,00%, e aumentou gradativamente em 0,50% até chegar a 6,00%, como costume do laboratório. A Tabela 11 indica a quantidade em peso de agregado para um corpo de prova para composição de CBUQ comum.

Tabela 12 - Preparação C.P. Marshall - CBUQ comum

(continua)

Preparação C.P. Marshall – CBUQ Comum					
Peso amostra total (g)	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00
% CAP- 50/70 (g)	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
Peso do CAP. (g)	48,0	54,0	60,0	66,0	72,0

Tabela 13 - Preparação C.P. Marshall - CBUQ comum

(conclusão)

Preparação C.P. Marshall – CBUQ Comum					
Peso amostra total (g)	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00
Brita 1 (g)	172,8	171,9	171,0	171,1	169,2
Brita 0 (g)	345,6	343,8	342,0	340,2	338,4
Pó de pedra (g)	633,6	630,3	627,0	623,7	620,4
Peso Amostra s/ CAP. (g)	1152,0	1146,0	1140,0	1134,0	1128,0

Fonte: Autoras.

Para o CBUQ com adição de 15% de material fresado, mantendo a mesma porcentagem de cimento asfáltico, o peso dos agregados se dá conforme tabela 12.

Tabela 14 - Preparação C.P. Marshall - CBUQ com 15% de material fresado

Preparação C.P. Marshall – CBUQ com 15% de material fresado					
Peso amostra total (g)	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00
% CAP- 50/70 (g)	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
Peso do CAP. (g)	48,0	54,0	60,0	66,0	72,0
Material fresado (g)	172,8	171,9	171,0	171,1	169,2
Composição de CBUQ comum (g)	979,2	974,1	969,0	963,9	958,8
Peso Amostra s/ CAP. (g)	1152,0	1146,0	1140,0	1134,0	1128,0

Fonte: Autoras.

A tabela 13 indica o peso dos agregados para o CBUQ com 20% de material fresado.

Tabela 15 - Preparação C.P. Marshall - CBUQ com 20% de material fresado

Preparação C.P. Marshall – CBUQ com 20% de material fresado					
Peso amostra total (g)	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00
% CAP- 50/70 (g)	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
Peso do CAP. (g)	48,0	54,0	60,0	66,0	72,0
Material fresado (g)	230,4	229,2	228,0	226,8	225,6
Composição de CBUQ comum (g)	921,6	916,8	912,0	907,2	902,4
Peso Amostra s/ CAP. (g)	1152,0	1146,0	1140,0	1134,0	1128,0

Fonte: Autoras.

Para o CBUQ com composição de 30% de material fresado foi necessário alterar o CBUQ comum, reduzindo a porcentagem de pó de brita, conforme a tabela 14.

Tabela 16 - Preparação C.P. Marshall - CBUQ comum com redução de pó de brita

Preparação C.P. Marshall – CBUQ Comum com redução de pó de brita					
Peso amostra total (g)	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00
% CAP- 50/70 (g)	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
Peso do CAP. (g)	48,0	54,0	60,0	66,0	72,0
Brita 1 (g)	172,8	171,9	171,0	171,1	169,2
Brita 0 (g)	460,8	458,4	456,0	453,6	451,2
Pó de pedra (g)	518,4	515,7	513,0	510,3	507,6
Peso Amostra s/ CAP. (g)	1152,0	1146,0	1140,0	1134,0	1128,0

Fonte: Autoras.

Finalmente, para o CBUQ com substituição de 30% dos seus agregados por material fresado, o peso se dá conforme a tabela 15.

Tabela 17 - Preparação C.P. Marshall - CBUQ com 30% de material fresado

Preparação C.P. Marshall – CBUQ com 30% de material fresado					
Peso amostra total (g)	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00
% CAP- 50/70 (g)	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
Peso do CAP. (g)	48,0	54,0	60,0	66,0	72,0
Material fresado (g)	345,6	343,8	342,0	340,2	338,4
Composição de CBUQ comum (g)	806,4	802,2	798,0	793,8	789,6
Peso Amostra s/ CAP. (g)	1152,0	1146,0	1140,0	1134,0	1128,0

Fonte: Autoras.

Os agregados foram pesados conforme as tabelas acima, colocados em recipientes e posteriormente aquecidos em estufa a uma temperatura média de 150°C, próxima da temperatura do ligante. Foi adicionado à cada amostra a quantidade de CAP pré-estabelecida e rapidamente misturado até a completa cobertura dos agregados. Logo após, foram levados novamente para estufa, afim de manter a temperatura estável. Os CPS foram moldados e obedecendo o parâmetro da norma foram levados para compactação, sofrendo 75 golpes cada molde. Após a compactação os CPS foram mantidos na estufa a 150°C. Cerca de 30 minutos antes do rompimento, cada corpo de prova foi resfriado em banho maria a 60°C.

3.10 MÉTODO DE ENSAIO 155 (DNIT, 2010) – DETERMINAÇÃO DA PENETRAÇÃO

A penetração do CAP é determinada pela distância que uma agulha penetra verticalmente em uma amostra de cimento asfáltico. Quanto maior for a penetração, mais “mole” será o cimento asfáltico.

O ensaio é regido pela norma ME 155 - Determinação da penetração do material asfáltico (DNIT, 2010), onde é determinada e avaliada a consistência do asfalto, que é a resistência a fluir dependendo da temperatura (estado de fluidez). Para a execução deste ensaio são necessários, um recipiente de penetração, um penetrômetro, agulhas, cuba de transferência, cronômetro graduado e termômetros de imersão total. O experimento procede-se pela medida da penetração da agulha (100 g) no recipiente de penetração após 5 segundos a 25°C. O resultado é obtido pela penetração em décimos de milímetro e deve ser a média obtida de no mínimo três determinações.

3.11 MÉTODO DE ENSAIO 131 (DNIT, 2010) – DETERMINAÇÃO DO PONTO DE AMOLECIMENTO – MÉTODO DO ANEL E BOLA

Segundo a norma ME 131 (DNIT, 2010), para que seja determinado o ponto de amolecimento dos materiais asfálticos na faixa de 30°C a 157°C, utiliza-se a aparelhagem anel e bola. Esse ensaio tem por definição o uso de uma bola de aço, com dimensão e peso especificados por norma, no centro de uma amostra do material que está condicionado, dentro de um anel também padronizado. O conjunto que envolve o anel e a bola é colocado dentro de um recipiente com glicerina para um banho, que é aquecida a uma taxa de temperatura controlada que gira em torno de 5°C/min.

Quando ocorre o deslocamento da amostra de asfalto juntamente com a bola para o fundo da placa, devido ao amolecimento do asfalto e ao peso que a bola possui, é anotada a temperatura em que se encontra o material nesse exato momento para que se tenha a

medida do ponto de amolecimento e esse mesmo teste é feito com duas amostras do material. A diferença entre os resultados de ensaios sucessivos, obtidos pelo mesmo operador, com a mesa aparelhagem, sob condições constantes de operação em amostras do mesmo material, só pode ser superior a 2°C um caso em vinte.

3.12 MÉTODO DE ENSAIO 148 (DNER, 1994) – MATERIAL BETUMINOSO – DETERMINAÇÃO DOS PONTOS DE FULGOR E DE COMBUSTÃO (VASO ABERTO CLEVELAND)

Essa norma técnica define o procedimento a ser utilizado para a determinação dos pontos de fulgor e de combustão de produtos de petróleo e estabelece valores quanto a repetibilidade e reprodutibilidade. Esta metodologia de ensaio acontece com um considerável aumento de temperatura e é utilizado para materiais viscosos com ponto de fulgor igual ou maior do que 79°C.

O ensaio se inicia pelo enchimento da cuba de ensaio com 70 ml de amostra e colocação da mesma no centro do aquecedor. Caso aconteça de o líquido escorrer pelo externo da cuba, a mesma deve ser retirada, lavada, seca e o ensaio é iniciado novamente, por questões de segurança. Toda e qualquer espuma ou bolha de ar na superfície deve ser desfeita ou retirada sem alterar o nível da amostra.

Seguindo com o ensaio, primeiramente deve-se aquecer a amostra de forma constante de 14-17°C/min. Quando a temperatura da amostra estiver a 56°C abaixo do ponto de fulgor esperado deve-se abaixar a temperatura para que a taxa de aumento nos últimos 28°C antes do ponto de fulgor seja em torno de 5-6°C/min. Quando a temperatura chegar ao ponto de 28°C antes do ponto de fulgor esperado deve-se passar a chama de ensaio através do centro da cuba em ângulo reto com movimentos contínuos e suavemente, de forma que se aplique em linha reta ou ao longo de uma circunferência de um círculo com raio mínimo de 150 mm (± 1).

O centro da chama de ensaio é movido em apenas uma direção e na próxima aplicação da chama, deve ser passada na direção oposta à da aplicação anterior. O tempo consumido na passagem da chama pela cuba em cada caso deve ser de $1,0 \pm 0,1$ s, considera-se que o ponto de fulgor é a menor temperatura do líquido em que uma chama larga aparece e se propaga acima da superfície da amostra e se esvai rapidamente.

3.13 VISCOSIDADE

O ensaio de viscosidade tem como objetivo medir a consistência dos materiais betuminosos em estado líquido. Definindo a relação entre a viscosidade e temperatura é possível, em laboratório e em campo, quantificar de forma prática as temperaturas adequadas para a mistura, espalhamento e compactação da massa asfáltica.

Conforme a ES 031 (DNIT, 2006b), a viscosidade pode ser obtida pelo Método de Ensaio 004 (DNIT, 1994) que determina que sejam utilizadas as referências da norma NBR 14950 - Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade Saybolt Furol (ABNT, 2003). O ensaio da norma é dividido em dois procedimentos, onde no procedimento A temperatura analisada varia de 21°C e 99°C e no procedimento B a temperatura varia de 120°C e 240°C. Proceder-se ainda de forma simples e rápida e é medido em segundos onde o asfalto flui no orifício (Furol), nas temperaturas descritas na norma, preenchendo um frasco de 60 cm³ (viscosímetro).

A tabela 16 apresenta os resultados obtidos com os ensaios.

Tabela 18 - Resultados ensaio com CAP

Característica	Método	Especificação	Resultado	Unidade
Penetração a 25°C, 5s, 100g	ME 155/10	50 a 70	51	mm
Ponto de amolecimento	ME 131/10	Mínimo 46	47,5	°C
Ponto de Fulgor	ME 148/94	Mínimo 235	310	°C
Viscosidade a 135°C	NBR 14950	Mínimo 141	153	s

Fonte: Autoras.

3.14 MÉTODO DE ENSAIO 043 (DNER, 1995) – ENSAIO MARSHALL

O objetivo do ensaio Marshall é determinar a estabilidade e a fluência de misturas betuminosas de cimento asfáltico, a quente, para uso em pavimentação, com agregado de tamanho 25,4 mm máximo, por intermédio da aparelhagem Marshall.

Primeiramente faz-se a seleção da faixa granulométrica a ser utilizada de acordo com os limites das normativas do DNIT e faz-se a escolha da composição dos agregados de forma a enquadrar a sua mistura, ou seja, é escolhido o percentual em massa de cada agregado para formar a mistura. Em seguida, faz-se a determinação das massas específicas reais do cimento asfáltico de petróleo e dos agregados disponíveis.

Então escolhe-se as temperaturas de mistura e de compactação, a partir da viscosidade-temperatura do ligante. A temperatura do ligante na hora de ser misturado ao agregado deve ser equivalente para que a sua viscosidade esteja entre 75 e 150 SSF (Segundos Saybolt-Furol). A temperatura de compactação deve ser equivalente para que o ligante apresente viscosidade na faixa de 125 a 155 SSF;

Em seguida é possível determinar e adotar os teores de asfalto para os diferentes grupos de CP a serem moldados, e cada grupo deve ter no mínimo três CPs: é sugerido um teor de asfalto em % para o 1º grupo e os outros grupos terão o teor de asfalto acima (sugestão: T+0,5% e T+1%) e abaixo (sugestão: T-0, 5% e T-1%).

A montagem dos corpos de prova se dá nas seguintes etapas: adição de asfalto aos agregados, homogeneização, colocação da mistura no molde, compactação da mistura e extração do CP. Após o resfriamento e desmoldagem dos CPs, verifica-se as dimensões do mesmo (diâmetro e altura) e é determinada a sua massa seca (MS) e submersa em água (MSsub). Com esses valores obtém-se a massa específica aparente (GMB) e em comparativo com a massa específica teórica (DMT) é possível obter as relações de volume típicas da dosagem.

A partir do teor de asfalto do grupo dos CPs, em questão (%A) ajusta-se o percentual em massa de cada agregado, ou seja:

$$\%n = \%n \times (100\% - \%a) \quad (5)$$

Em que:

%n é o percentual da massa do agregado 'n' na mistura asfáltica.

Com base em %n, %a e nas massas específicas reais constituintes, obtém-se a DMT correspondente ao teor de asfalto considerável (%a), usando-se a equação:

$$DMT = \frac{100}{\frac{\%a}{Ga} + \frac{\%Ag}{GAg} + \frac{\%Am}{GAm} + \frac{\%f}{Gf}} \quad (6)$$

Em que:

% a = porcentagem de asfalto;

%Ag, %Ame, %f = porcentagem do agregado graúdo, agregado miúdo e fíler, respectivamente;

G_a , G_{Ag} , G_{Am} e G_f = massas específicas reais do asfalto, do agregado graúdo, do agregado miúdo e do fíler.

O cálculo dos parâmetros de dosagem para cada corpo de prova é dado através da equação:

$$V = M_s - M_{Sub} \quad (7)$$

A massa específica aparente da mistura é obtida pela equação:

$$G_{mb} = \frac{M_s}{V} \quad (8)$$

Os valores volumétricos a seguir devem sempre ser calculados com valores GMB médio, de três corpos de prova:

Calcula-se o volume de vazios, através da equação 6:

$$V_v = \frac{DMT - G_{mb}}{DMT} \quad (9)$$

Calcula-se a porcentagem em massa dos agregados pela equação:

$$\sum \%n = 100 - \%a \quad (10)$$

Os vazios do agregado mineral são obtidos pela equação seguinte:

$$V_{AM} = 100 - (G_{mb} \times \sum \frac{\%n}{G_{sb}}) \quad (11)$$

Finalmente a relação betume/vazios é calculada através da equação 12:

$$RBV = 100 \times \left(\frac{V_{AM} - V_v}{V_{AM}} \right) \quad (12)$$

Após as medidas volumétricas, os CPs são imersos em banho-maria a 60°C em torno de 30 a 40 minutos. Cada CP deve ser retirado e colocado rapidamente dentro do molde de compressão, então se determina por meio da prensa Marshall, os seguintes fatores mecânicos:

Estabilidade (N): definida pela carga máxima a qual o CP resiste antes da ruptura, como um deslocamento ou rompimento de agregado de modo a causar diminuição da carga necessária para manter o prato da prensa se deslocando a uma taxa constante de 0,8 mm/s;

Fluência (mm): É o deslocamento na vertical apresentado pelo CP correspondente a aplicação da carga máxima.

Teor de ligante asfáltico: Determinado fazendo o uso de dos parâmetros volumétricos V_v e RBV.

Os resultados de estabilidade e fluência estão descritos na tabela 17.

Tabela 19 - Ensaio de estabilidade e fluência Marshall

(continua)

Estabilidade e Fluência Marshall					
Betume (%)	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
CBUQ COMUM					
Est. Corrig (kgf)	801	1127	1419	1823	1171
Fluência (mm)	1,7	2,7	3,0	3,7	5,3
CBUQ COM 15% DE FRESADO					
Est. Corrig (kgf)	1404	1406	1423	1384	1325
Fluência (mm)	3,0	3,3	4,3	6,3	9,3

Tabela 20 - Ensaio de estabilidade e fluência Marshall

(conclusão)

Estabilidade e Fluência Marshall					
CBUQ COM 20% DE FRESADO					
Est. Corrig (kgf)	1468	1626	1664	1423	1354
Fluência (mm)	3,0	4,0	5,5	6,0	6,7
CBUQ COM 30% DE FRESADO					
Est. Corrig (kgf)	1351	1395	1535	1614	1532
Fluência (mm)	3,3	5,7	7,0	8,0	9,0

Fonte: Autoras.

3.15 MÉTODO DE ENSAIO 117 (DNER, 1994) – MISTURA BETUMINOSA – DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE APARENTE

A norma estabelece a densidade de corpos de prova moldados em laboratório. Para a realização deste ensaio deve-se analisar a porcentagem de vazios, pois para os CPs com até 7%, pesa-se o corpo de prova ao ar e imerso em água.

Após levantar os dados, calcula-se a densidade aparente do corpo de prova através da expressão:

$$d = \frac{Par}{Par - Pi} \quad (13)$$

Em que:

d = Densidade aparente do CP;

Par = Peso do CP, determinada ao ar;

Pi = Peso do CP imerso em água;

Assim, a partir dos dados já obtidos, é possível determinar o teor ótimo de CAP para a mistura calculada, conforme tabela 18. Para produção da camada de revestimento de pavimento flexível deve-se observar os seguintes parâmetros, considerando uma média dos resultados de 03 corpos de prova (PINTO, 2018. reimp):

- Porcentagem de Vazios: 3 % a 5%.
- Relação Betume/Vazios (R.B.V.): 75 % a 82 %.
- Estabilidade Marshall: > 500 kgf.
- Fluência: 2,0 mm – 4,5 mm.
- % CAP: 4,5 % a 9%
- Vazios do agregado mineral (V.A.M): > 15.

Tabela 21 - Características do traço

(continua)

Densidade		Vazios	R.B.V.	Estabilidade	Fluência	% CAP	V.A.M.
Aparente	Teórica						
Características do traço – CBUQ comum							
2,385	2,459	3,0	81,0	1831	3,5	5,4	15,89
Características do traço – CBUQ com 15% de material fresado							
2,396	2,475	3,2	79,0	1418	4,3	5,0	15,12

Tabela 22 - Características do traço

(conclusão)

Características do traço – CBUQ com 20% de material fresado							
2,386	2,481	3,8	75,1	1689	5,1	4,8	15,34
Características do traço – CBUQ com 30% de material fresado							
2,393	2,513	4,8	71,5	1629	7,0	5,0	16,72

Fonte: Autoras.

3.16 MÉTODO DE ENSAIO 136 (DNIT, 2018) – MISTURAS ASFÁLTICAS – DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Para a realização deste ensaio são necessários uma prensa mecânica com sensibilidade igual ou inferior a 19,60 N, um sistema de refrigeração e um paquímetro. Para a preparação da amostra, deve ser moldado um corpo-de-prova de forma cilíndrica, com altura entre 3,50 cm e 6,50 cm e diâmetro de $10 \pm 0,2$ cm. Então deve-se medir a altura e o diâmetro do corpo-de-prova, colocá-lo num compartimento com a temperatura controlada de $25 \pm 0,5^\circ\text{C}$ por um período de 4 (quatro) horas, antes da realização do ensaio. Em seguida, o corpo de prova deve ser posicionado no dispositivo centralizador, com sua superfície cilíndrica entre os dois frisos metálicos, curvos em uma das faces. Deve-se então aplicar a carga vertical de compressão progressivamente, com uma velocidade de deformação de $0,8 \pm 0,1$ mm/s, até que se dê a ruptura, por separação das duas metades do corpo-de-prova, segundo o plano diametral vertical e anota-se o valor da carga de ruptura. Com o valor obtido é calculada a resistência à tração do corpo-de-prova rompido através da equação:

$$\sigma_r = \frac{2F}{\pi \times D \times H} \quad (14)$$

Em que:

 σ_r – resistência à tração, em kgf/cm²;

F – carga de ruptura, em kgf;

D – diâmetro de corpo-de-prova, em cm;

H – altura do corpo-de-prova, em cm.

A tabela 19 apresenta os resultados do ensaio de tração por compressão diametral realizados no CBUQ com adição de material fresado.

Tabela 23 - Ensaio de tração por compressão diametral

(continua)

Tração por compressão diametral					
Betume (%)	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
CBUQ COM 15% DE FRESADO					
Corpos de prova	2	4	9	10	13
Tração por compressão Diametral (kgf)	1404	1406	1423	1384	1325

Tabela 24 - Ensaio de tração por compressão diametral

(conclusão)

Tração por compressão diametral					
CBUQ COM 20% DE FRESADO					
Corpos de prova	1	5	7	10	13
Tração por compressão Diametral (kgf)	1182,40	1191,90	1193,00	1183,30	1193,90
CBUQ COM 30% DE FRESADO					
Corpos de prova	1	4	7	10	13
Tração por compressão Diametral (kgf)	1206,50	1186,10	1191,90	1198,00	1181,70

Fonte: Autoras.

4 TRAÇO FINAL

Depois de finalizados os ensaios e conseqüentemente a apresentação e análise dos resultados, é possível estabelecer o traço ideal. Esse dado é passado em porcentagens e será calculado em peso a partir da quantidade a ser produzida. Com os dados apresentados nesse estudo, a dosagem de melhor desempenho teórico seria com o ajuste dos agregados de acordo com a tabela 20.

Tabela 25 - Traço Final

Agregados	CBUQ comum		CBUQ com material fresado					
	% sem CAP	% com CAP	15%		20%		30%	
			% sem CAP	% com CAP	% sem CAP	% com CAP	% sem CAP	% com CAP
Brita 1	15,00	14,19	12,75	12,11	12,00	11,42	10,50	9,98
Brita 0	30,00	28,38	25,5	24,23	24,00	22,84	28,00	26,60
Pó de Brita	55,00	52,03	46,75	44,41	44,00	41,87	31,50	29,92
Material fresado	-	-	15,00	14,25	20,00	19,03	30,00	28,50
CAP	-	5,4	-	5,0		4,84		5,00

Fonte: Autoras.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos resultados apresentados, é possível afirmar que para cada tipo de material a ser utilizado para o investimento de um pavimento de qualidade, haverá um estudo a ser feito, considerando a origem dos materiais e a finalidade da produção. Assim, é apresentado todos os ensaios necessários para uma determinação eficaz de traço de CBUQ. Para os ensaios executados, observa-se a ES 031 normas do Departamento Nacional e Infraestrutura e Trânsito (DNIT, 2006b), que estabelece os limites e parâmetros necessários para avaliação dos resultados.

Os ensaios de caracterização dos agregados como granulometria, abrasão, de índice de forma foram satisfatórios em relação ao material disponível na região. Quanto ao

clima da região, o CAP utilizado atende aos padrões da norma e também possui o ponto de amolecimento e penetração condizentes e necessários para aumentar a durabilidade da massa asfáltica. Deve-se também considerar que os CPs podem sofrer alterações dependendo da forma de compactação (compactação mecânica ou manual) e podem não obter resultados eficientes caso ocorram bruscas variações de temperatura durante o preparo e manuseio dos corpos de prova.

De acordo com os resultados dos ensaios para a composição do CBUQ utilizando os mesmos materiais usados neste estudo, não é recomendado a substituição de mais que 15% dos agregados por material fresado na composição do CBUQ, pois a fluência foge do padrão estabelecido apresentando valor superior a 5mm. Ainda assim, o material fresado apresentou um resultado melhor que o esperado para este estudo, possibilitando o uso na composição do CBUQ, evitando o descarte no meio ambiente e diminuindo o custo da pavimentação.

Considerando também que há pouco material como referência para pesquisa, no estudo e análise do CBUQ com adição de fresado, esta pesquisa busca instigar novos estudos sobre o destino do material fresado no Brasil, para aumentar o conhecimento na área e diminuir os impactos causados ao meio ambiente.

Para a realização de futuros experimentos na área de pavimentação com a reutilização do material fresado, se possível, sugere-se que sejam utilizados materiais de diferentes fontes, afim de que, com uma maior quantidade de materiais e tipos de agregados, seja possível determinar qual a porcentagem de substituição ideal para melhor desempenho do CBUQ.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7809: Agregados Graúdos - Determinação Do Índice De Forma Pelo Método Do Paquímetro**. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14950: Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade Saybolt Furol**. Rio de Janeiro, 2003.

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

BERNUCCI, Liedi Bariani; CERATTI, Laura Maria Goretti; CERATTI, Jorge Augusto Pereira. **Pavimentação Asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobrás, 2008. 488 p.

DNER ME (1998). ME – 035/98. Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”. Departamento Nacional de Estradas e Rodagens.

DNER ME (1995). ME – 043/95. Ensaio Marshall. Departamento Nacional de Estradas e Rodagens.

DNER ME (1994). ME – 053/94. Misturas Betuminosas – Porcentagem de Betume. Departamento Nacional de Estradas e Rodagens.

DNER ME (1997). ME – 054/97. Equivalente de Areia. Departamento Nacional de Estradas e Rodagens.

DNER ME (1994). ME – 078/94. Agregado graúdo – Adesividade e Ligante Betuminoso. Departamento Nacional de Estradas e Rodagens.

DNER ME (1998). ME – 083/98. Agregados – Análise Granulométrica. Departamento Nacional de Estradas e Rodagens.

DNER ME (1994). ME – 086/94. Agregado – Determinação do Índice de Forma. Departamento Nacional de Estradas e Rodagens.

DNER ME (1994). ME – 117/94. Mistura Betuminosa – determinação da densidade aparente. Departamento Nacional de Estradas e Rodagens.

DNER ME (1997). PRO – 120/97. Coleta de amostras de agregados. Departamento Nacional de Estradas e Rodagens.

DNER ME (1994). ME – 148/94. ABNT NBR 11341/2008 – Derivados de Petróleo – determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto de Cleveland. Departamento Nacional de Estradas e Rodagens.

DNIT (2006). **Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – ES 031.** Diretoria de Planejamento e Pesquisa.

DNIT (2006). **Manual de Pavimentação.** Publicação IPR – 719. Ministério dos transportes. Departamento Nacional de infra-estrutura de transportes, Instituto de pesquisas rodoviárias.

DNIT (2006). **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos.** Publicação IPR – 720. Ministério dos transportes. Departamento Nacional de infra-estrutura de transportes, Instituto de pesquisas rodoviárias.

DNIT (2011). **Fresagem a frio – Especificação de serviço.** Publicação IPR – 159. Ministério dos transportes. Departamento Nacional de infra-estrutura de transportes, Instituto de pesquisas rodoviárias.

GOMES, Luiz Fernando Trindade. **Estudo da viabilidade do uso de material fresado com adição de cimento como opção de base e sub-base em pavimentos.** 2015. 75 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2015.

GOMES, Kamilla Souza; SILVA, Renato Leite Martins da. **Estudo de dosagem para definição do traço do CBUQ faixa C ideal com materiais da região de Anápolis - Goiás.** 2018. 77 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Unievangélica, Anápolis, 2018.

PINTO, Salomão, PINTO, Isaac Eduardo. **Pavimentação asfáltica - conceitos fundamentais sobre materiais e revestimentos asfálticos.** 1. Ed. - [Reimpr.]. - Rio de Janeiro: LTC, 2018.

PREGO, Atahualpa Schmitz da Silva. **A memória da pavimentação no brasil:** fatos históricos, recordações, depoimentos. Rio de Janeiro: Abpv, 2001. 640 p.

SCHNEIDER, Emanuelle Dayane; PORFÍRIO, Maria Aparecida Silva; SCHROH, Mariana Reinert. **Investigação do potencial de contaminação ambiental associado à disposição em solo de resíduos asfálticos**. 2015. 58 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.