

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

ANACLÉCIO PAULO FERNANDO DALA

**RECICLAGEM DE ASFALTO RECUPERADO USANDO AGENTE
REJUVENESCEDOR**

**CRICIÚMA - SC
2016**

ANACLÉCIO PAULO FERNANDO DALA

**RECICLAGEM DE ASFALTO RECUPERADO USANDO AGENTE
REJUVENESCEDOR**

Trabalho de Conclusão de Curso,
apresentado para obtenção do grau de
Engenheiro de Materiais no curso de
Engenharia de Materiais da Universidade do
Extremo Sul Catarinense, UNESC.

Orientador: Prof^o. Dr. Adriano Michael
Bernardin.

CRICIÚMA -SC

2016

ANACLÉCIO PAULO FERNANDO DALA

**RECICLAGEM DE ASFALTO RECUPERADO USANDO AGENTE
REJUVENESCEDOR**

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado pela Banca Examinadora para obtenção do Grau de Engenheiro de Materiais no Curso de Engenharia de Materiais da Universidade do Extremo Sul Catarinense, UNESC, com Linha de Pesquisa em Reciclagem.

Criciúma, 27 de Junho de 2016.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Adriano Michael Bernardin – PhD – (UNESC) – Orientador

Prof. Pedro Arns - Mestre – (UNESC)

Prof. Luiz Renato Steiner – Mestre – (UNESC)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer à Deus por tudo. À minha querida mãe Ana de Lourdes Dala, por me fazer ser esse homem que eu sou, com muito orgulho, e por todo esforço incalculável que sempre fez para que eu pudesse estar sempre bem, ao meu pai Fernando Dala (*in memoriam*), aos meus irmãos, que sempre me apoiaram e ajudaram.

Ao meu orientador Prof. Dr. Adriano Michael Bernardin, por ajudar-me a encontrar o tema do trabalho que desejei, e por ajudar-me na construção do mesmo passando-me um conhecimento além acadêmico.

Ao Prof. Dr. Joe Arnaldo Villena Del Carpio, por disponibilizar o seu tempo e ajudar-me na realização do desenvolvimento deste trabalho, assim como todos os membros do Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação do IPARQUE (Parque Científico e Tecnológico) da UNESC - Universidade do Extremo sul Catarinense, em especial ao Giovani dos Reis que ajudou-me na realização de todos os ensaios.

À Juliana Búrigo, pelo apoio, pela motivação, pela paciência e por toda ajuda na realização deste trabalho.

Agradeço aos meus amigos de verdade, com os quais sempre aprendi coisas para vida, aos meus colegas que passaram várias horas comigo durante a formação compartilhando informação e conhecimento, e à todos os professores que ajudaram-me no meu processo de formação.

“Sou o resultado do que uma grande mulher quis fazer de mim.”

Autor Desconhecido

RESUMO

O asfalto utilizado em pavimentação é um ligante betuminoso que provém da destilação do petróleo, e que tem a propriedade de ser um adesivo termoviscoplastico, impermeável à água e pouco reativo. A baixa reatividade química a muitos agentes não evita que esse material possa sofrer, no entanto, um processo de envelhecimento por oxidação lenta pelo contato com o ar e a água. Esta oxidação leva à degradação do asfalto, ou seja, o asfalto fica envelhecido ao longo do tempo, sendo necessária a sua troca. Para evitar o descarte sem aproveitamento desse material, é possível fazer a sua reutilização a 100%. Vários estudos e testes comprovam que é possível a reutilização desse material, pelo uso de aditivos modificadores para recuperar o asfalto envelhecido, devolvendo ao asfalto as suas propriedades originais e/ou até dar-lhe melhores propriedades. Neste estudo foi reutilizado asfalto recuperado num processo a quente. Para a realização do mesmo foi feita a coleta de asfalto envelhecido, fresado na Rodovia Governador Rafael Fernandes, BR 101 km 1780. Foi feito um ensaio laboratorial de granulometria desta massa asfáltica envelhecida fresada. A partir da análise granulométrica e do teor de ligante do mesmo, chegou-se a valores de percentuais de agregado e ligante nele contido. De posse desses dados, foi possível a realização de uma nova mistura asfáltica, a qual foi submetido ao ensaio de tração diametral. Com os resultados comparou-se os valores de resistência à tração entre a mistura asfáltica nova e a mistura asfáltica rejuvenescida. O asfalto fresado passou por um processo de rejuvenescimento através do uso de um agente rejuvenecedor a base de óleo de xisto, conhecido comercialmente como AR-5. Entre as diversas conclusões obtidas neste estudo, constatou-se que o uso do AR-5 melhorou o comportamento mecânico do asfalto envelhecido, quando comparado a uma mistura asfáltica nova. As análises físicas e mecânicas mostraram que a reciclagem de asfalto envelhecido fresado utilizando rejuvenecedor é uma solução tecnicamente possível e ambientalmente correta para pavimentação.

Palavras-chave: Pavimento. Asfalto envelhecido. Reciclagem de asfalto. Agente Rejuvenecedor.

ABSTRACT

The asphalt used in paving is a bituminous binder which comes from the distillation of petroleum and which has the property of being an thermo-viscoplastic adhesive, waterproof and less reactive. The low chemical reactivity to many agents do not prevent the material may suffer, however, an aging process by slow oxidation by contact with air and water. This oxidation leads to degradation of the asphalt, that is, the asphalt is aged over time, necessitating its replacement. To avoid dropping without use of this material, it is possible to reuse 100%. Several studies and trials have shown that it is possible to reuse this material, by the use of modifying additives to restore aged asphalt, asphalt returning to its original properties and / or to give it better properties. In this study it was reused asphalt recovered in a hot process. To perform the same was made the collection of aged asphalt, milled on Highway Governor Rafael Fernandes, BR 101 km 1780. A laboratory test particle size of this aged asphalt was milled done. From particle size analysis and binder content of it, we came to aggregate percentage values and binder contained therein. With this data, it was possible to make a new asphalt mixture, which was submitted to the diametrical tensile test. With the results compared to the tensile strength values between the new asphalt mix and rejuvenated asphalt mixture. The milled asphalt passed by a rejuvenation process by using a rejuvenator shale oil based commercially known as AR-5. Among the many findings obtained in this study, it was found that the use of AR-5 improved the mechanical behavior of aged asphalt when compared to a new asphalt mixture. The physical and mechanical analysis showed that the recycling of milled asphalt aged using rejuvenator is a technically feasible solution and environmentally friendly paving.

Keywords: Paviment. Aged asphalt. Asphalt recycling. Rejuvenating Agent.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Comportamento do CAP em função do tempo de aplicação de carga	15
Figura 2 - Modelo de micelas de Yen	17
Figura 3 - Consumo brasileiro de asfalto entre 2000 e 2009	17
Figura 4 - Camadas de pavimento asfáltico	18
Figura 5 - Reciclagem a frio	21
Figura 6 - Local da fresagem do asfalto	22
Figura 7 - Extração do pavimento envelhecido	23
Figura 8 - Extração do pavimento envelhecido	23
Figura 9 - Material coletado.....	24
Figura 10 - Percloroetileno	25
Figura 11 - Material envelhecido fresado.....	26
Figura 12 - Rotarex de lavagem centrífuga	26
Figura 13 - Peneiras utilizadas na granulometria	27
Figura 14 - Peneiras utilizadas na granulometria	27
Figura 15 - Curva granulométrica da extração	28
Figura 16 - Soquete.....	30
Figura 17 - Corpos-de-prova de asfalto novo	31
Figura 18 - Material envelhecido fresado antes.....	31
Figura 19 - Esquema do ensaio de resistência à tração estática por compressão diametral	32
Figura 20 - Ensaio de resistência à tração	33
Figura 21 - Corpos-de-prova de asfalto	34
Figura 22 - Corpos-de-prova de asfalto novo	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação do CAP no Brasil	15
Tabela 2 - Especificação do agente rejuvenecedor AR-5	29
Tabela 3 - Granulometria do material novo	35
Tabela 4 - Granulometria do material fresado	36
Tabela 5 - Resistência à tração das misturas asfálticas novas.....	36
Tabela 6 - Espessuras dos corpos-de-prova.....	36
Tabela 7 - Resistência à Tração das misturas asfálticas rejuvenescida	37
Tabela 8 - Espessuras dos corpos-de-prova.....	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AD	Asfalto Diluído
ANP	Agência Nacional de Petróleo
AP	Asfalto de Petróleo
AR	Agente Rejuvenescedor
ASTM	American Standard Test Methods
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
DNC	Departamento Nacional de Combustível
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
EA	Emulsão Asfáltica
IBP	Instituto Brasileiro de Petróleo
IDT	Instituto de Engenharia e Tecnologia
IPARQUE	Parque Científico e Tecnológico
NA	Asfalto Natural
Pen	Penetração
RT	Resistência à Tração por Compressão Diametral
SAE	Society of Automotive Engineers – EUA
UNESC	Universidade do Extremo sul Catarinense
σ_T	Resistência à Tração por Compressão Diametral
Rod.	Rodovia
Gov.	Governador

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVOS.....	12
1.1.1 Objetivo geral	12
1.1.2 Objetivos específicos.....	13
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1 MATERIAIS BETUMINOSOS.....	14
2.2 CAP (CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO)	14
2.3 ASFALTO ENVELHECIDO	19
2.4 RECICLAGEM DE ASFALTO	20
2.4.1 Reciclagem a quente.....	20
2.4.2 Reciclagem a Frio	21
3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	22
3.1 SELEÇÃO DO ASFALTO A SER RECUPERADO	22
3.2 PERCLOROETILENO.....	24
3.3 EXTRAÇÃO DO LIGANTE DO MATERIAL FRESADO.....	25
3.4 CARACTERIZAÇÃO DA MISTURA ASFÁLTICA ENVELHECIDA FRESADA....	28
3.5 AGENTE REJUVENESCEDOR AR-5	28
3.6 PREPARAÇÃO DE CORPOS-DE-PROVA	29
3.7 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL....	32
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA	35
4.2 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO.....	36
5 CONCLUSÃO	38
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	39
REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

O termo reciclagem não é uma novidade, já vem sendo utilizado há alguns anos. Reciclar significa transformar objetos, materiais usados em novos produtos para o consumo. As preocupações ambientais, cada vez mais, têm sido tratadas por uma cobrança muito maior às empresas pelos governos e por organizações preocupadas com questões ambientais. A reciclagem tem um grande impacto na redução da poluição global. A prática da reciclagem gera redução de custos de produção nas indústrias.

A reciclagem de asfalto é uma prática relativamente recente, mas de uma relevância bem considerável. Visto que o reaproveitamento de materiais existentes no asfalto envelhecido, para produção de um novo asfalto, ajuda na redução de exploração de certos minérios e conseqüentemente na maior preservação do ambiente.

O asfalto é um dos mais antigos e versáteis materiais de construção utilizados pelo homem. O *Manual de asfalto* (IA, 1989 versão em português, 2001) lista mais de 100 das principais aplicações desse material, desde a agricultura até a indústria. O uso em pavimentação é um dos mais importantes entre todos e um dos mais antigos também. Na maioria dos países do mundo, a pavimentação asfáltica é a principal forma de revestimento. (BERNUCCI et al., 2007). Mundialmente o asfalto é o material mais usado na pavimentação de estradas e rodovias, totalizando 95% no mundo todo.

Há várias razões para o uso intensivo do asfalto em pavimentação, sendo as principais: proporciona forte união dos agregados, agindo como um ligante que permite flexibilidade controlável; é impermeabilizante, é durável e resistente à ação da maioria dos ácidos, dos álcalis e dos sais, podendo ser utilizado aquecido ou emulsionado, em amplas combinações de esqueleto mineral, com ou sem aditivos. (BERNUCCI et al., 2008).

A prática da reciclagem de asfalto pode ser realizada a frio ou a quente. *'in situ'* ou em usina. Nos dias de hoje essa prática é mais simples e tecnológica.

As principais vantagens da reciclagem a quente estão basicamente relacionadas com o uso de asfalto envelhecido como material constituinte, o que implica na redução do uso de agregado virgem e de betume. O asfalto envelhecido pode ser reciclado no local ou em usina, mas dificuldades técnicas ou questões

ambientais limitam o uso de asfalto envelhecido. (BOCCI; GRILLI, 2011).

As características da massa asfáltica envelhecida tais como a graduação, tipo e as propriedades do betume residual desempenham um papel fundamental na fase de projeto da mistura. Outras características, tais como homogeneidade, corpos estranhos e teor de água influenciam significativamente a qualidade da produção. (OLIVEIRA et al., 2012).

O meio técnico rodoviário tem se esforçado para buscar novas tecnologias e desenvolver soluções mais econômicas de restauração dos pavimentos, muitos já bastante deteriorados. Entre as novas metodologias estudadas, destaca-se a reciclagem dos revestimentos asfálticos, que além de apresentar rapidez executiva e custos competitivos, preza pelo aspecto ambiental. (DELLABIANCA, 2004).

Devido a certa falta de interesse demonstrada pela sociedade, a assuntos como sustentabilidade, gerencia de recursos esgotáveis, surgiu o interesse de realizar-se este estudo para contribuir de alguma forma com a preservação do ambiente, visando na qualidade no meio social e no impacto econômico que a indústria de pavimentação causa. No presente estudo procurou-se fazer a reutilização de pavimento asfáltico para se obter redução de custos nas usinas de asfalto e, conseqüentemente a preservação do ambiente, objetivando a sua aplicação no Brasil e em Angola.

Devido à escassez de tempo para a execução, no presente estudo não foi possível a realização de vários ensaios programados. Graças ao avanço da tecnologia e com o auxílio outros trabalhos e estudos, realizaram-se comparações e ensaios predominantes para a reciclagem de pavimento asfáltico.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O principal objetivo deste projeto de pesquisa foi estudar o processo de reciclagem a quente de asfalto envelhecido para a produção de concreto asfáltico usando aditivo rejuvenescedor.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa foram:

- a) Desenvolver e/ou adaptar metodologias de reciclagem a quente de asfalto recuperado;
- b) Desenvolver, consolidar e aumentar a competitividade da tecnologia industrial nacional;
- c) Utilizar técnicas de caracterização química, física e mecânica dos materiais desenvolvidos;
- d) Avaliar as propriedades finais dos asfaltos reciclados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MATERIAIS BETUMINOSOS

Os petróleos ou óleos crus diferem em suas propriedades físicas e químicas, variando de líquidos negros viscosos até líquidos castanhos bastante fluidos, com composição química predominantemente parafínica, naftênica ou aromática. Existem perto de 1.500 tipos de petróleo explorados no mundo, porém somente uma pequena porção deles é considerada apropriada para produzir asfalto. (SHELL, 2003).

Os materiais betuminosos são, por definição, misturas de hidrocarbonetos solúveis em bissulfeto de carbono (CS₂), com propriedades de aglutinação.

Existem duas categorias de materiais betuminosos: os asfaltos e os alcatrões. Os alcatrões não ocorrem na natureza, sendo obtidos a partir de transformações químicas, como por exemplo, da destilação de matéria orgânica tal como carvão, linhito, xisto e matéria vegetal. Possuem sempre elevada porcentagem de carbono livre, o que naturalmente diminui a solubilidade no bissulfeto de carbono. (PINTO, 2003). Já não é mais usado na pavimentação.

Os asfaltos são materiais aglutinantes de cor escura, derivados do petróleo, sendo que o elemento predominante é o betume, cerca de 99,5%. O betume, muitas vezes usado como sinônimo de asfalto é uma substância aglutinante escura composta principalmente por hidrocarbonetos de alto peso molecular, totalmente solúvel em bissulfeto de carbono. Podem ser utilizados em várias aplicações, como por exemplo, em impermeabilização de construções civis e, principalmente, em obras de pavimentação. (ROBERTS et al., 1998).

2.2 CAP (CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO)

Cimento asfáltico de Petróleo ou CAP é um líquido viscoso, semissólido ou sólido, a temperatura ambiente, que apresenta comportamento termoplástico, tornando-se líquido se aquecido e retornando ao estado original após resfriamento. Obtido através de diversos processos de destilação do petróleo, ele é quase totalmente solúvel em benzeno, tricloroetileno e em bissulfeto de carbono. De acordo com a resolução da ANP, Agência Nacional do Petróleo, Gás e Biocombustíveis nº

19 de 11/06/2005, contendo regulamento técnico nº3 de 2005, os asfaltos para pavimentação voltaram a ser classificados por penetração. Pode-se observar a classificação do CAP na Tabela 1.

Os CAPs são constituídos de 90 a 95% de hidrocarbonetos e de 5 a 10% de heteroátomos (oxigênio, enxofre, nitrogênio e metais – vanádio, níquel, ferro, magnésio e cálcio) unidos por ligações covalentes. Os cimentos asfálticos de petróleos brasileiros têm baixo teor de enxofre e de metais, e alto teor de nitrogênio, enquanto os procedentes de petróleos árabes e venezuelanos têm alto teor de enxofre (LEITE, 1999).

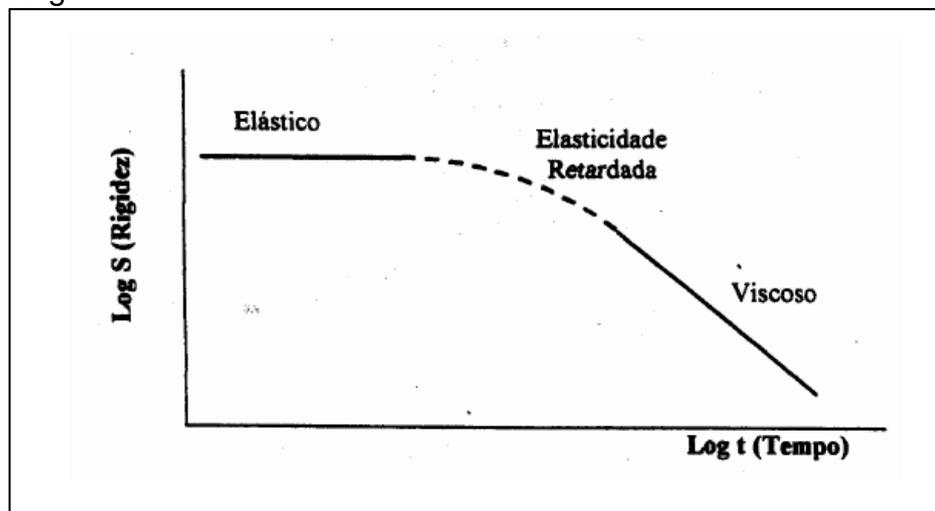
Tabela 1 - Classificação do CAP no Brasil

Característica	CAP 30/45	CAP 50/70	CAP 85/100	CAP 150/200
Penetração (0,1 mm)	30 - 45	50 - 70	85 - 100	150 - 200

Fonte: Norma DNIT 095/2006-EM (BRASIL, 2006b).

O CAP é um material complexo que apresenta um comportamento viscoso, caracterizado pela diminuição da rigidez para longos períodos de aplicação de carga, e susceptibilidade térmica, caracterizada pela alteração de propriedades (viscosidade, rigidez, consistência) em função da temperatura como mostra a Figura 1.

Figura 1 - Comportamento do CAP em função do tempo de aplicação de carga



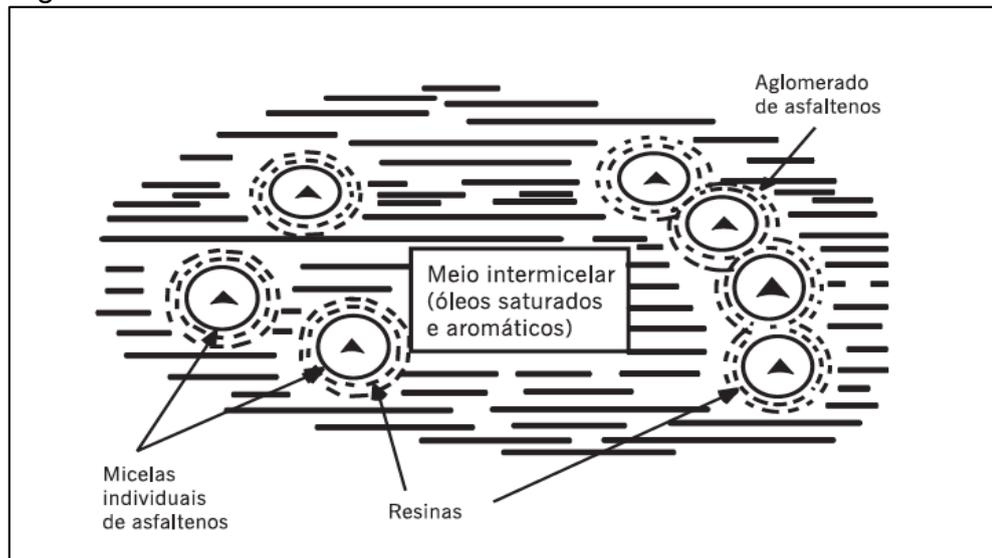
Fonte: Roberts et al. (1998) adaptado.

O CAP é obtido da destilação do petróleo e constitui-se de 90 a 95% de hidrocarbonetos, apresentando uma composição química complexa que varia devido à origem do petróleo, com aproximadamente 82 a 88% de carbono, 8 a 11% de hidrogênio, 0 a 6% de enxofre, 0 a 1,5% de oxigênio e 0 a 1% de nitrogênio. (SHELL, 2003).

Visando melhorar as propriedades dos CAPs, tem-se adicionado modificadores para aumentar o desempenho dos pavimentos, quanto à resistência ao acúmulo de deformação permanente, ao aparecimento de trincas por fadiga e por contração térmica, retardando o envelhecimento do material e melhorando a adesividade. (LING et al., 1997).

O CAP é tradicionalmente considerado uma dispersão coloidal (GIRDLER, 1965) de asfaltenos em saturados e aromáticos, conhecidos genericamente por maltenos, imersos em resinas, que são como micelas diretas ou reversas, ou seja, grupos polares orientados para fora ou para o centro. O modelo de Yen ou modelo de micelas (YEN, 1991) está representado na Figura 2 Uma micela é um aglomerado de moléculas em uma solução coloidal. Um colóide é uma mistura que consiste de grandes moléculas simples, dispersas em uma segunda substância (LEITE, 1999; HUNTER, 2000). Em presença de quantidade suficiente de resinas e aromáticos, os asfaltenos formam micelas com boa mobilidade e resultam em ligantes conhecidos como Sol. Porém, se as frações não estão bem balanceadas, há formação de estruturas de pacotes de micelas com vazios internos que resultam em ligantes de comportamento conhecido como Gel, sendo um exemplo desse tipo os asfaltos oxidados utilizados em impermeabilizações. Esse comportamento Gel pode ser minimizado com o aumento de temperatura. (LEITE, 1999; SHELL, 2003).

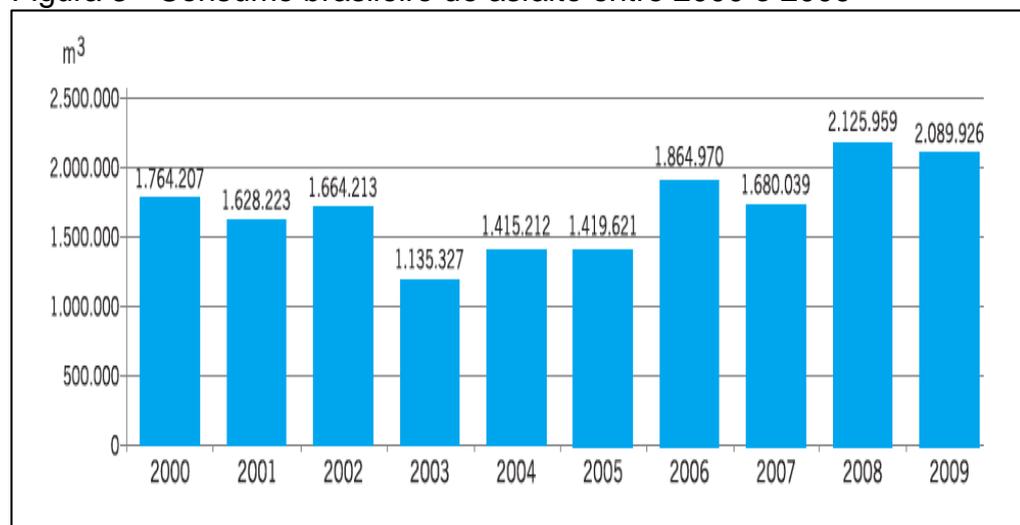
Figura 2 - Modelo de micelas de Yen



Fonte: Bernucci et al. (2008).

Os asfaltos são aglomerados de compostos polares e polarizáveis formados por associações intermoleculares, constituídos de hidrocarbonetos naftênicos condensados e de cadeias saturadas curtas, sendo sólidos amorfos pretos ou marrons. A quantidade de asfaltos tem grande efeito nas características reológicas do CAP: quanto maior o percentual de asfaltos, mais duro e mais viscoso será o ligante asfáltico, embora se deva considerar ainda a forma do asfalto, sendo maior o efeito sobre a reologia quanto mais esférica for a partícula. Em geral os asfaltos constituem de 5 a 25% do CAP. (SHELL, 2003). A Figura 3 mostra o consumo brasileiro de asfalto de 2000 a 2009.

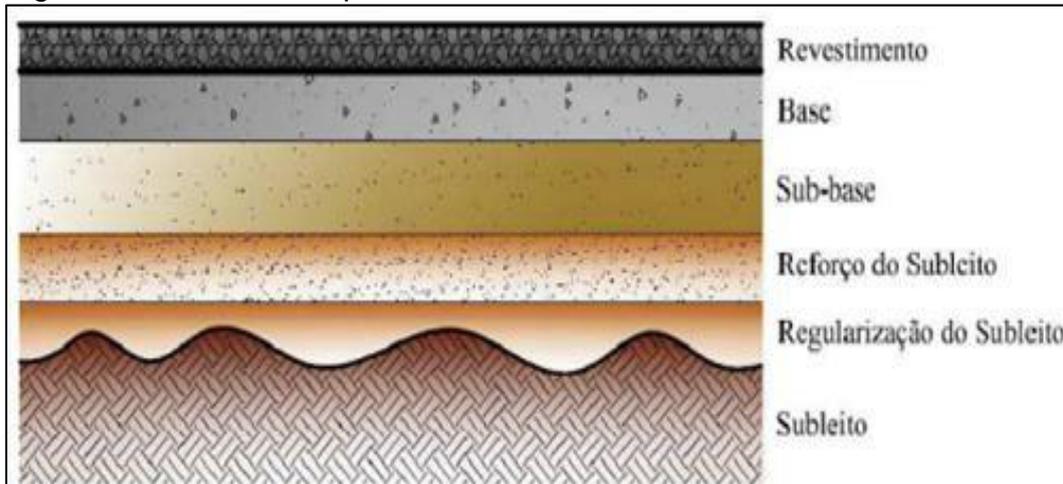
Figura 3 - Consumo brasileiro de asfalto entre 2000 e 2009



Fonte: Bernucci et al. (2008).

O pavimento asfáltico é composto por várias camadas, cada uma delas com a sua importância, na Figura 4 podemos verificar como cada camada se apresenta:

Figura 4 - Camadas de pavimento asfáltico



Fonte: Marques (2007).

Segundo Marques e Neckel (2008), cada camada tem a seguinte especificação:

- a) **revestimento (asfáltico):** é a camada que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos, a qual deve resistir aos esforços atuantes, além de ser a camada destinada a impermeabilizar o pavimento, melhorar as condições de rolamento, proporcionando conforto e segurança aos usuários;
- b) **base:** é a camada destinada a resistir aos esforços gerados pelo tráfego e transmiti-los ao subleito, devendo ter um índice de Suporte Califórnia (ISC) maior que 60%;
- c) **sub-base:** é a camada complementar à base, com as mesmas funções, e executada por motivos econômicos (reduz a espessura da base). Deve ter ISC maior que 20%;
- d) **reforço de subleito:** é uma camada existente em pavimentos muito grossos, com espessura constante transversalmente e variável longitudinalmente, tendo como função melhorar a qualidade do subleito. Deve ter ISC maior que 2%;
- e) **regularização do subleito:** também é conhecido como nivelamento,

é a camada de espessura variável, destinada a preparar o leito da estrada para receber o pavimento. A existência desta camada está relacionada com as condições do subleito;

- f) **subleito:** é o terreno onde ocorrerá o assentamento do pavimento. Deve-se examinar/estudar até onde a profundidade acontecerá e as tensões que irão atuar.

2.3 ASFALTO ENVELHECIDO

O envelhecimento de um ligante asfáltico pode ser definido como sendo o processo de endurecimento que este sofre durante a estocagem, usinagem, aplicação e em serviço, responsável pela alteração de suas características físicas, químicas e reológicas que causam um aumento na sua consistência. (TONIAL, 2001).

O envelhecimento do ligante asfáltico do revestimento ocorre em três etapas: a primeira, durante o processo de usinagem e representa 60% do envelhecimento total sofrido pelo ligante; a segunda, durante a estocagem (não é comum nas usinas brasileiras), transporte, espalhamento e compactação, representando aproximadamente 20% do envelhecimento total sofrido pelo ligante; na terceira etapa, o envelhecimento ocorre durante a vida útil do revestimento devido à ação do meio ambiente e representa 20% do envelhecimento total do ligante. (WHITEOAK, 2003).

Os asfaltos sofrem envelhecimento (endurecimento) de curto prazo quando misturados com agregados minerais em usinas devido a seu aquecimento. O envelhecimento de longo prazo do ligante ocorre durante a vida útil do pavimento que estará submetido a diversos fatores ambientais. Os ensaios de envelhecimento acelerado designados de “efeito do calor e do ar” são usados para tentar simular o envelhecimento do ligante na usinagem. (BERNUCCI et al., 2008).

De maneira geral, os agentes de reciclagem devem se constituir em aditivos que, quando incorporados ao CAP envelhecido, sejam capazes de devolver-lhes as propriedades reológicas originais. Os rejuvenescedores devem repor no ligante asfáltico os componentes aromáticos e as resinas, cujos teores foram perdidos por efeitos do envelhecimento. (LEITE et al., 1990).

2.4 RECICLAGEM DE ASFALTO

Por reciclagem de pavimentos entende-se a reutilização total ou parcial dos materiais existentes no revestimento e/ou da base e/ou da sub-base, em que os materiais são remisturados no estado em que se encontram após a desagregação ou tratados por energia térmica e/ou aditivados com ligantes novos ou rejuvenescedores, com ou sem recomposição granulométrica. (MOMM; DOMINGUES, 1995).

A reciclagem é assim, mais uma opção de reabilitação de pavimentos degradados e não se deve reciclar simplesmente porque é um cenário ecológico, mas sim porque é tecnicamente adequado e dela derivam vantagens econômicas, tanto para as empresas como para as administrações. (AZEVEDO, 2009b).

Entre os principais benefícios que a reciclagem pode oferecer, pode-se citar os seguintes. (DNER, 1998):

- a) conservação de agregados, de ligantes e de energia;
- b) preservação do meio ambiente;
- c) manutenção das condições geométricas existentes.

Consoante à necessidade e ao tipo de restauração ou reabilitação do pavimento, a reciclagem de asfalto pode ser efetuada a quente ou a frio.

2.4.1 Reciclagem a quente

A reciclagem a quente de pavimentos é um processo em que parte ou todo revestimento asfáltico é removido e reduzido a dimensões apropriadas para depois ser misturado a quente no próprio local '*in situ*' ou em usina estacionária. O processo pode incluir a adição de novos agregados, cimento asfáltico e agente rejuvenescedor. O produto final deve atender às especificações de misturas asfálticas a quente destinadas às camadas de base, de ligação ou de rolamento.

A reciclagem a quente das camadas asfálticas de revestimento do pavimento, é feita atualmente por intermédio das seguintes Normas aprovadas pelo DNIT:

- a) DNIT 033/2005-ES – Pavimentos Flexíveis – Concreto asfáltico reciclado a quente na usina – Especificação do Serviço; e
- b) DNIT 034/2005-ES - Pavimentos Flexíveis – Concreto asfáltico

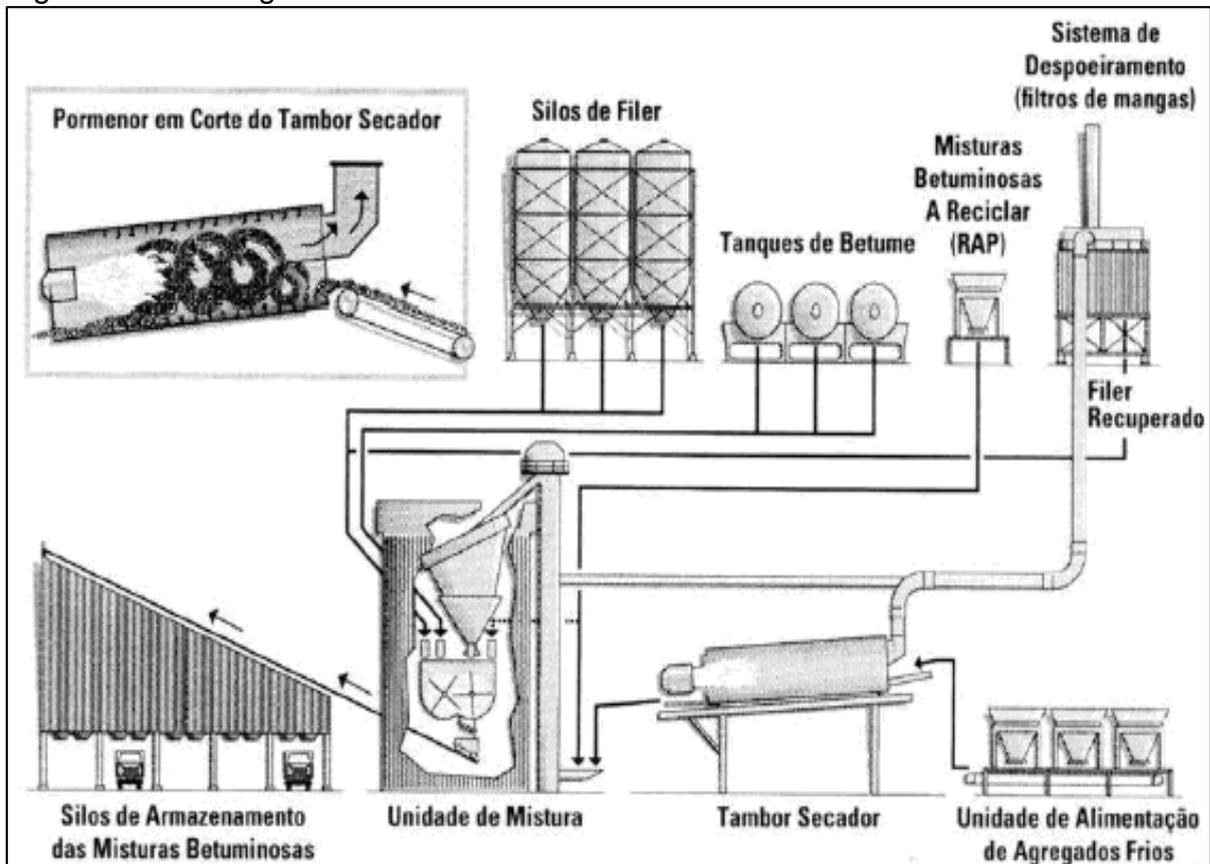
reciclado a quente no local – Especificação do Serviço.

2.4.2 Reciclagem a Frio

Quando o reprocessamento dos materiais de pavimentação ocorre sem o dispêndio de energia para o aquecimento dos mesmos, esta técnica é designada de reciclagem a frio. (MOMM; DOMINGUES, 1995).

Nos métodos a frio (Figura 5) a introdução das misturas betuminosas a reciclar é feita quer na altura da descarga do secador para o elevador de agregados quentes, sendo o material aquecido pelo contato com os novos agregados sobreaquecidos antes de entrar para o misturador, quer diretamente para o misturador. No misturador é adicionada à mistura a quantidade adequada de betume novo, de acordo com as propriedades pretendidas para a mistura betuminosa. É importante evitar aquecimentos excessivos dos novos constituintes adicionados. (AZEVEDO, 2009b).

Figura 5 - Reciclagem a frio



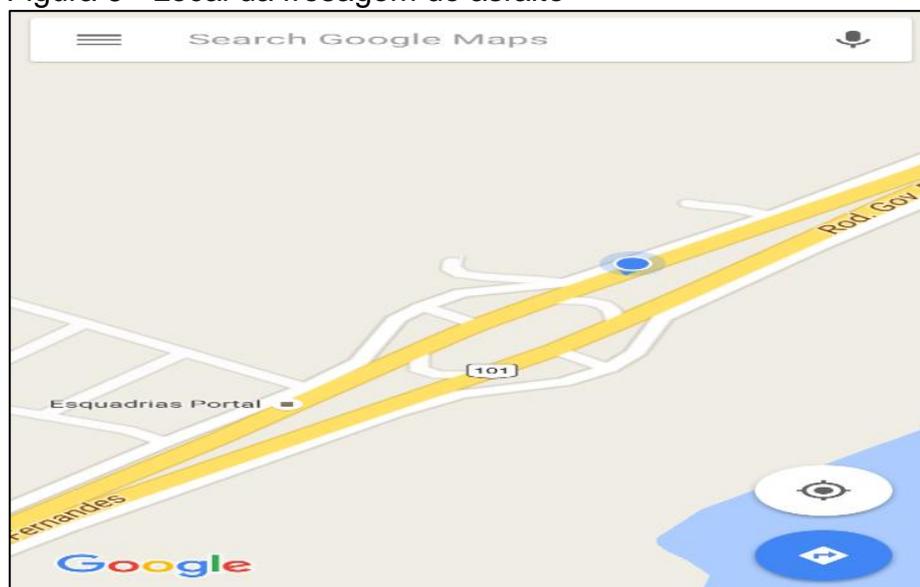
Fonte: (AZEVEDO, 2009b).

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1 SELEÇÃO DO ASFALTO A SER RECUPERADO

A mistura asfáltica envelhecida que foi utilizada neste estudo teve a sua coleta feita no dia 29/04/2016 por meio de fresagem a frio. Essa coleta foi realizada na Rod. Gov. Rafael Fernandes, BR 101 km 1780, Três Cachoeiras, RS, CEP 95580-000. Como mostra o mapa (Figura 6), a fresagem foi feita pela empresa Castellar Engenharia Ltda.

Figura 6 - Local da fresagem do asfalto



Fonte: Google Maps (2016).

As Figuras 7 e 8 mostram a extração do pavimento envelhecido, ou seja, a sua fresagem, a operação, e a Figura 9 o material coletado.

Figura 7 - Extração do pavimento envelhecido



Fonte: Do Autor (2016).

Figura 8 - Extração do pavimento envelhecido



Fonte: Do Autor (2016).

Figura 9 - Material coletado



Fonte: Do Autor (2016).

3.2 PERCLOROETILENO

Para a extração do ligante da mistura asfáltica envelhecida foi utilizado o percloroetileno, ou tetracloroetileno (Figura 10). O percloroetileno permite um desengraxe perfeito, é utilizado em máquinas adequadas com as técnicas seguintes: fase líquida, fase vapor e fase líquida-vapor. Seu poder solvente a quente permite dissolver rapidamente e totalmente qualquer óleo ou graxa saponificável, ou não. Composição: Cl_4C_2 (Fonte: quimidrol.com.br 2016).

Figura 10 - Percloroetileno



Fonte: Do Autor (2016).

3.3 EXTRAÇÃO DO LIGANTE DO MATERIAL FRESADO

Para se fazer um estudo detalhado do material envelhecido fresado, foi feita uma seleção de uma amostra de 1139,6 g que permaneceu em estufa durante o período de 01:30 (uma hora e trinta minutos) à temperatura de 170 °C (Figura 11). Elevou-se a temperatura do material envelhecido fresado para que a extração do ligante desse material fosse possível.

Foi feito o uso de um equipamento Rotarex elétrico (Figura 12) para a extração do ligante do material fresado. A extração do ligante foi efetuada num ciclo de 4 lavagens centrífugas com percloroetileno. Após a extração do ligante envelhecido, foi feito um aquecimento ao material para que o mesmo ficasse totalmente seco. Passados 40 minutos, tempo necessário para que o material resfriasse, pesou-se o material e o mesmo apresentou uma massa de 1081,3 g, o que quer dizer que haviam 58,3 g de ligante no material envelhecido, o que equivale a 5,11 % do teor de betume.

Posteriormente, foi feito um peneiramento no material usando-se várias malhas, conforme a norma NBR – 5734 (ABNT), (Figuras 13 e 14), para se saber o peso exato de cada agregado, desde a pedra ao pó de pedra, para que a partir

desses dados fossem feitos novos corpos-de-prova com um asfalto e agregados novos.

Figura 11 - Material envelhecido fresado



Fonte: Do Autor (2016).

Figura 12 - Rotarex de lavagem centrifuga



Fonte: Do Autor (2016).

Figura 13 - Peneiras utilizadas na granulometria



Fonte: Do Autor (2016).

Figura 14 - Peneiras utilizadas na granulometria

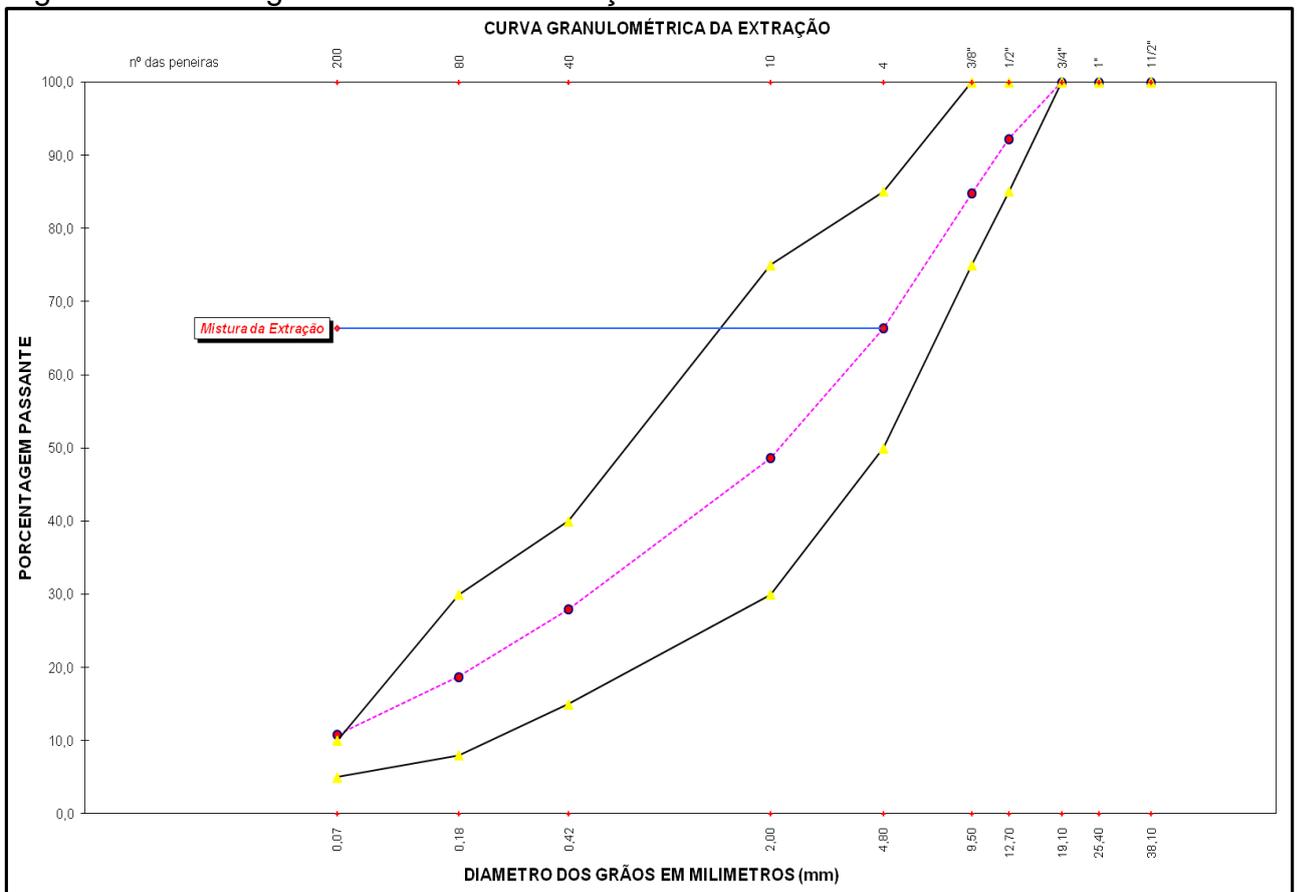


Fonte: Do Autor (2016).

3.4 CARACTERIZAÇÃO DA MISTURA ASFÁLTICA ENVELHECIDA FRESADA

Por meio do extrator centrífugo de betume (rotarex), determinou-se o teor de ligante existente na mistura asfáltica envelhecida, que apresentou um valor de 5,11 % de teor de ligante na mistura asfáltica envelhecida fresada. Essa mistura passou por um processo de análise granulométrica, que resultou numa curva (Figura 15), que se encontra dentro dos limites estipulados pela FAIXA “C” de trabalho do DNIT 031/2006 ES (BRASIL, 2006a) e do DEINFRA (SANTA CATARINA, 1992).

Figura 15 - Curva granulométrica da extração



Fonte: Do Autor (2016).

3.5 AGENTE REJUVENESCEDOR AR-5

Os Agentes Rejuvenescedores a Quente (AR) são produtos especialmente formulados para serem usados em serviços de reciclagem de pavimento (em usina ou *in-situ*). A reciclagem de pavimentos é uma técnica que visa à reutilização dos agregados e ligantes do revestimento antigo, necessitando de

agente rejuvenecedor para redução da viscosidade e reposição de compostos aromáticos e resinas para recompor as características do ligante. (BETUNEL, 2016).

O AR é usado para recompor a consistência original do ligante asfáltico presente no revestimento que está sendo reciclado, pois contém compostos aromáticos que devolvem ao asfalto a característica original de ductilidade e consistência (propriedades reológicas) perdidas pelo envelhecimento deste ao longo do tempo de serviço do pavimento. Os AR são asfaltos de baixa consistência, usados em serviços de reciclagem a quente. (BETUNEL, 2016).

Para o rejuvenescimento da mistura asfáltica envelhecida foi utilizado o agente rejuvenecedor AR-5, fornecido pela empresa Betunel Indústria e Comércio Ltda. A Tabela 2 mostra as suas especificações.

Tabela 2 - Especificação do agente rejuvenecedor AR-5

Características	Métodos de ensaio	Valores
Ponto de anilina ¹ , °C	ASTM D 611	31,5
		37,8°C (100°F)
Viscosidade absoluta, cSt	ASTM D 2171	2.232
		40°C (104°F)
Densidade	-	1.756
VGC ²	ASTM D 2501	0,9969
Viscosidade Saybolt Furol, sSF	MB-517	0,2076
Asfaltenos, % em peso	ASTM D 2007	15,32
Ponto de fluidez, ³ °C	ASTM D 97	4,5
Ponto de fulgor, °C	MB-50	+12
Carbono aromático, NMR ⁴ %	-	232
		36,9

Fonte: Six-Petrobras (2008) adaptado.

3.6 PREPARAÇÃO DE CORPOS-DE-PROVA

Para a moldagem dos corpos-de-prova, foi feito um peneiramento de pedras, pedriscos e pó de pedra com as malhas ½"; 3/8"; 4; 10; 40; 80; 200 conforme a norma NBR – 5734 (ABNT), para que fossem confeccionados corpos-de-prova exatamente baseados no material envelhecido fresado. Foram confeccionados

cinco corpos-de-prova com material novo, ou seja, uma mistura asfáltica totalmente nova. Cada uma das amostras possuía massa de 1200 g, sendo 1138,6 g de agregados e 61,4 g de ligante. Esse material foi aquecido em estufa à 150 °C que é a temperatura de usinagem do asfalto, onde permaneceu trinta minutos para posteriormente ser compactado. Para a compactação da mistura asfáltica foi utilizado um soquete (Figura 16), conforme a norma DNER-ME 043/1995. (BRASIL, 1995). A Figura 17 mostra os cinco corpos-de-prova de asfalto novo.

Também foram moldados três corpos-de-prova com material envelhecido fresado (Figura 18), combinados com 0.6 g de AR-5 para se obter uma amostra rejuvenescida. O asfalto envelhecido fresado permaneceu na estufa durante um período de 18h (dezoito horas) à temperatura de 110 °C para uma melhor homogeneização do mesmo. Em seguida, esse asfalto foi misturado com 0.6 g de AR-5, e permaneceu na estufa durante trinta minutos à temperatura de 150 °C para posteriormente sofrer a compactação. A compactação foi feita com a utilização do mesmo soquete, conforme a norma DNER-ME 043/1995 (BRASIL, 1995).

Figura 16 - Soquete



Fonte: Do Autor (2016).

Figura 17 - Corpos-de-prova de asfalto novo



Fonte: Do Autor (2016).

Figura 18 - Material envelhecido fresado antes de ir ao forno



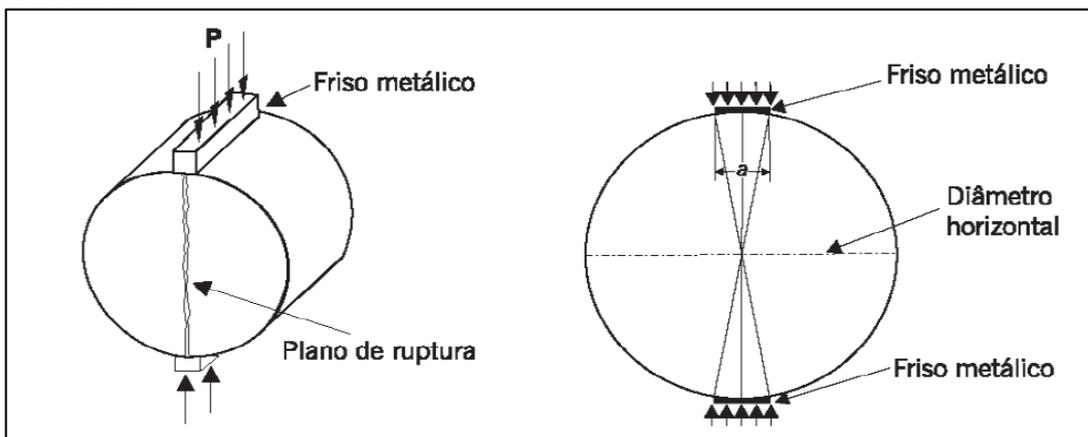
Fonte: Do Autor (2016).

3.7 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

A resistência à tração indireta estática corresponde à máxima tensão de tração suportada por um corpo de prova quando este é submetido a um carregamento estático de compressão, ao longo do plano diametral, até a ruptura.

Esse ensaio é realizado em corpos-de-prova cilíndricos, consiste na aplicação de uma carga estática de compressão distribuída ao longo de duas geratrizes opostas, conforme pode-se observar na Figura 19 o esquema do ensaio de resistência à tração estática por compressão diametral.

Figura 19 - Esquema do ensaio de resistência à tração estática por compressão diametral



Fonte: DNIT (2009).

Onde:

a – Corda do friso (12,7mm);

P – Carga aplicada.

O ensaio tem como objetivo determinar a resistência à tração de corpos de prova cilíndricos. Com o valor da carga de ruptura (FR), a resistência à tração do corpo de prova é calculada segundo a equação (1) a seguir.

$$RT = \frac{2 \cdot FR}{100 \cdot \pi \cdot D_{cp} \cdot h_{cp}} \quad (1)$$

Onde:

RT = resistência à tração, MPa;

FR = carga de ruptura, N;

D_{cp} = diâmetro do corpo de prova, cm;

h_{cp} = altura do corpo de prova, cm.

Os corpos-de-prova foram submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral (Figura 20), para que fosse obtida a resistência à tração de cada um deles. Antes do ensaio de tração os corpos permaneceram durante duas horas imersos em água a temperatura de 60°C para simular a temperatura do pavimento num dia normal em uma estrada. Nas Figuras 21 e Figura 22 podem ser observados os corpos-de-prova após o ensaio, conforme a norma DNIT 136/2010 ME. (BRASIL, 2010a).

Figura 20 - Ensaio de resistência à tração



Fonte: Do Autor (2016).

Figura 21 - Corpos-de-prova de asfalto rejuvenescido



Fonte: Do Autor (2016).

Figura 22 - Corpos-de-prova de asfalto novo



Fonte: Do Autor (2016).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados referentes aos ensaios realizados na mistura asfáltica envelhecida fresada, na mistura asfáltica nova e na mistura asfáltica rejuvenescida.

4.1 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

A partir dos resultados obtidos pelo ensaio de análise granulométrica da mistura asfáltica envelhecida e do valor de teor de ligante existente nessa mistura, 5,11 %, foram feitas misturas asfálticas com um ligante e agregados novos. Na Tabela 3 pode-se verificar a composição do material novo baseado no asfalto envelhecido.

Tabela 3 - Granulometria do material novo

Peneiras ABNT	Massa Retida (g)
¾"	-
½"	87,7
3/8"	85,4
Nº4	209,5
Nº10	202,7
Nº40	234,5
Nº80	105,9
Nº200	89,9
Fundo	123,0
Total	1138,6
Teor de CAP %	5,11
Peso de CAP (g)	61,4

Fonte: Do Autor (2016).

A Tabela 3 mostra os resultados da distribuição granulométrica para a mistura asfáltica 100 % nova e a Tabela 4 mostra os resultados da distribuição granulométrica para a mistura asfáltica envelhecida fresada. Os resultados foram positivos e os esperados, enquadram-se dentro da norma

Tabela 4 - Granulometria do material fresado

Peneiras ABNT	Massa Retida (g)
3/4"	-
1/2"	83,8
3/8"	80,2
Nº4	199,4
Nº10	192,3
Nº40	223,3
Nº80	99,8
Nº200	85,4
Fundo	117,1
Total	1081,3
Teor de CAP %	5,11
Peso de CAP (g)	61,4

Fonte: Do Autor (2016).

4.2 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

O controle Marshall, ou o ensaio de tração por compressão diametral para os corpos-de-prova com o asfalto novo, resultou nos valores que a Tabela 5 apresenta, assim como os valores dos pesos do corpos-de-prova ao ar e imersos em água. A Tabela 6, mostra as suas espessuras.

Tabela 5 - Resistência à tração das misturas asfálticas novas

Controle Marshall						
CP. Nº	1	2	3	4	5	Média
Massa ao ar (g)	1182,1	1179,2	1180,9	1084,7	1185,5	
Massa imerso (g)	729,2	726,0	728,7	666,5	731,1	
Leitura do anel (MPa)	1,713	2,086	2,182	1,887	2,056	1,984

Fonte: Do Autor (2016).

Tabela 6 - Espessuras dos corpos-de-prova

CP. Nº	1	2	3	4	5
Espessura 1 (cm)	57,8	57,9	57,0	52,8	57,0
Espessura 2 (cm)	57,2	57,4	56,9	52,8	57,3
Espessura 3 (cm)	56,7	57,5	56,9	52,7	57,2
Espessura 4 (cm)	57,2	57,6	56,9	52,5	57,7

Fonte: Do Autor (2016).

A Tabela 7 apresenta os valores de resistência à tração, os valores dos pesos do corpos-de-prova ao ar e imersos em água da mistura asfáltica rejuvenescida. A Tabela 8, mostra as suas espessuras.

Tabela 7 - Resistência à Tração das misturas asfálticas rejuvenescida

CONTROLE MARSHALL				
CP. Nº	1	2	3	Média
Massa ao ar (g)	1181,3	1183,3	1181,5	
Massa imerso (g)	688,5	705,4	701,6	
Leitura do anel (MPa)	1,355	1,546	2,041	1,647

Fonte: Do Autor (2016).

Tabela 8 - Espessuras dos corpos-de-prova

CP. Nº	1	2	3
Espessura 1 (cm)	63,3	61,6	60,8
Espessura 2 (cm)	63,5	61,8	61,0
Espessura 3 (cm)	63,3	62,0	61,0
Espessura 4 (cm)	63,4	61,7	60,8

Fonte: Do Autor (2016).

Fazendo-se uma comparação dos valores médios dos resultados da resistência à tração dos corpos-de-prova de mistura asfáltica nova e de mistura asfáltica rejuvenescida, pode-se observar uma certa diferença, mas essa diferença não apresenta problema algum para este estudo, visto que o valor médio resultante da mistura asfáltica rejuvenescida (com apenas 0,6 g de AR-5), está acima do valor de resistência à tração mínimo (0,650 MPa), exigido pela Norma DNIT 031/2006 ES (BRASIL, 2006a).

5 CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos neste estudo, pode-se concluir que:

a) Em relação à massa asfáltica fresada, observou-se que, com a extração do ligante residual, o material encontrava-se dentro da Faixa “C”, que é utilizada como padrão nas pavimentações asfálticas do tipo CBUQ. O que permite a sua reutilização sem que seja necessária a adição de outros agregados;

b) A utilização do agente rejuvenescedor AR-5 para rejuvenescimento de uma mistura asfáltica envelhecida, foi satisfatória e eficiente, mostrando um resultado positivo, porque melhorou as propriedades mecânicas da mistura asfáltica, sem o uso de algum agregado ou ligante adicional;

c) Fazendo-se um comparativo com outros estudos e artigos de pesquisa, pode-se perceber que o uso do AR-5 é muito frequente pela sua eficiência, mostrando sempre resultados positivos e em na maioria dos estudos, resultados melhores em relação à outros agentes rejuvenescedores. Estudos que foram utilizados para uma comparação – “AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO AGENTE REJUVENESCEDOR AR-5 NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DE UMA MISTURA ASFÁLTICA 100% RECICLADA (Claudia Cechella Zanette)”, e “AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE PRODUTOS REJUVENESCEDORES EM MISTURAS ASFÁTICAS (João Paulo Souza Silva);

d) Com os resultados obtidos neste trabalho, espera-se que surjam novas pesquisas relacionadas à reciclagem de mistura asfáltica recuperada, visto que é possível e viável, reduzindo-se assim os impactos ambientais causados pela exploração de recursos virgens e reduzindo-se os gastos das empresas com recursos novos.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Reciclagem a frio *'in situ'* com espuma de asfalto.

Uso de agentes estabilizadores para melhorar as propriedades do material existente no pavimento deteriorado.

REFERÊNCIAS

- ANP. Agência Nacional de Petróleo. 2005. **Resolução ANP Nº19**, de 11 de julho de 2005.
- ASPHALT INSTITUTE. **Hot-Mix Recycling**. The Asphalt Handbook MS-4, 1989.
- ASTM D 4402 (1995). **Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer**. American Society for Testing and Materials.
- AZEVEDO, M; CARDOSO, M. **Reciclagem a Quente em Central Betuminosa**. Actas das II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2003.
- AZEVEDO, M. **Construção e Reabilitação de Pavimentos – Ligantes Betuminosos**. Documento Base, INIR, Lisboa, 2009a.
- AZEVEDO, M. **Construção e Reabilitação de Pavimentos – Reciclagem de Pavimentos**. Documento Base, INIR, Lisboa, 2009b.
- BATISTA, F. A. **Conservação e Reabilitação de Pavimentos Rodoviários**. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 2005 (Baptista, 2005).
- BATISTA, F. A.; ANTUNES, M. **Reciclagem de Pavimentos Utilizando Ligantes Betuminosos**. 2as Jornadas Cepsa Betumes /CRP, Lisboa, 2009.
- BATISTA, F.A et al. **Reciclagem semi-quente de misturas betuminosas – Formulação e Caracterização do Desempenho**. 2as Jornadas Cepsa Betumes /CRP, Lisboa, 2009.
- BERNUCCI, Liedi Bariani et al. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 2006. 504 f. Incluindo Bibliografia. Patrocínio Petrobrás.
- _____. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2008.
- BETUNEL. **Especificação para Agentes Rejuvenescedores a Quente e Emulsionados**. 2016. Disponível em: <www.betunel.com.br>. Acesso em: 03 maio 2016.
- BOCCI, M; GRILLI, A. **Recycling the top layers of road pavement**. Bolzan, Italy: Brenner International Congress VIATEC, 2011.
- BUKOWSKI, J. R. **Guidelines for the design of superpave mixtures containing reclaimed asphalt pavement (RAP)**. San Antonio, TX: Memorandum, ETG Meeting. FHWA Superpave Mixtures Expert Task Group, 1997.
- CAPITÃO, S. D. **Misturas Betuminosas de Alto Módulo de Deformabilidade –**

Contribuição para a caracterização do seu comportamento. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 1996.

CASTRO, Luciana N. **Espuma de Asfalto**. Curso Avançado de Pavimentação Urbana, ABPv, setembro, Rio de Janeiro, 2002.

_____. **Reciclagem à Frio "in situ" com Espuma de Asfalto**. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2003, 171 p.

CORBET, M; LEE, S. Q; TERREL, R. **New Developments In Hot In-Place Recycling Technology and Specification**. Forty-Third Annual Conference of Canadian Technical Asphalt Association, Vancouver, Canada, 1998.

COSTA, A. M. B. **Misturas Betuminosas Recicladas a Quente em Central – Contribuição para o seu Estudo e Aplicação**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil – F.C.T.U.C., Coimbra.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM DNER, **Avaliação Objetiva da Superfície de Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos**, DNER-PRO 008/94, Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM DNER, **Concreto Betuminoso Reciclado à Quente na Usina**, DNER-ES 318/97, Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM DNER, **Concreto Betuminoso Reciclado à Quente no Local**, DNER-ES 319/97, Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM DNER, **Mistura Betuminosas - Determinação do Módulo de Resiliência**, DNER-ME 133/94, Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM DNER, **Misturas Betuminosas - Determinação da Resiliência à Tração por Compressão Diametral**, DNER-ME 138/94, Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM DNER, **Pavimentação - Reciclagem de Pavimento à Frio "in situ" com Espuma de Asfalto**, DNER-ES 405/00, Rio de Janeiro, 2000.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM DNER, **Manual de Reabilitação de Pavimentos Asfálticos**, Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM DNER, **Coletânea de Normas - Asfaltos Modificados por Polímero**, Rio de Janeiro, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM DNER, **Programa de Capacitação de Pessoal do DNER, Curso RP9 - Reciclagem de Pavimentos**,

v1 e v2, Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico, Rio de Janeiro, 1994.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Recycling of asphalt pavements using at least 80 percent recycled asphalt pavement (RAP)**. Engineering and environmental aspects of recycled materials for highway construction. Report no. FHWA-RD-93-088. Environmental Protection Agency and Federal Highway Administration, 1993.

GRILLI, A et al. Laboratory and in-plant validation of hot mix recycling using a rejuvenator. **International Journal of Pavement Research and Technology**. 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO IBP, **Informações Básicas sobre Materiais Asfálticos**, Rio de Janeiro, 1990.

LEITE, LENI F. M. et al. "Emprego do Resíduo Pesado de Óleo de Xisto como Agente de Reciclagem para Asfaltos". In: **Encontro de Asfalto**. 100, IBP, Rio de Janeiro, 1990.

LING, M et al. "Quantitative Analysis of Polymers and Crumb Rubber in Hot-Mix Asphalts". In: **Transportation Research Record**. Nº 1586, pp 57-67, TRB, Washington, DC, 1997.

MARQUES, Geraldo Luciano de Oliveira. **Camadas de pavimentos flexíveis**, 2007. NECKEL Glauciano. **Estudo do asfalto-borracha como revestimento asfáltico em pistas aeroportuárias**. Trabalho de conclusão de curso - Bacharel em Engenharia Civil - UDESC, Joinville, SC. 2008.

MOMM, Leto; DOMINGUES, F. A. A. "Reciclagem de Pavimentos à Frio "in situ" Superficial e Profunda". In: **Reunião Anual de Pavimentação**. 29a, Cuiabá, 1995.

MOTTA, Laura M. G.; PINTO, Salomão. "O Uso de Ensaios Estáticos na Definição de Parâmetros de Comportamento de Misturas Asfálticas". **Encontro de Asfalto**. 12, IBP, Rio de Janeiro, 1994.

MOTTA, Laura M. G et al. "Consideração sobre e Reciclagem com a Técnica de Asfalto-Espuma". In: **Encontro de Asfalto**. 15, IBP, Rio de Janeiro, 2000.

PEREIRA, D. R. M. et al. "Estudo da Influência de Aglomerantes em Pó e do Tipo de Ligante Asfáltico no Comportamento de Misturas Recicladas com Espuma de Asfalto". In: **Reunião de Pavimentação Urbana**. 11a, ABPv, Porto Alegre, 2002.

PINTO, Salomão. **Materiais Betuminosos - Conceituação, Especificação e Utilização**, ed. revisada, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2003.

RAP. Content in asphalt mixes based on expected mixture durability. **Final report submitted to the Ohio Department of Transportation**. 2002.

ROBERTS, F. L et al. **Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction**. NAPA Educational Foundation, Lanham, Maryland, 1998.

SHELL. **The Shell bitumen handbook**. 5. ed. London: Thomas Telford, 2003.

TONIAL, I. A. **Influência do Envelhecimento do Revestimento Asfáltico na vida de Fadiga de Pavimentos**. Tese de M. Sc. Rio de Janeiro: Coppe / RJ, 2001.

WHITEOAK, D. 2003. **Shell Bitumen Handbook**. London : Thomas Telford, Ltd, 2003.

YEN, T.F. **Asphaltene/resin plus oil interconversion: an investigation into colloidal model of asphaltenes**. Workshop: The Chemical Components and Structure of Asphaltic Materials, 1991, Roma, Itália. 1991.