

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

VITOR CHERVENSKI ESCOBAR

**COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO DE MISTURA SMA EFETUADA COM
ASFALTO MODIFICADO POR BORRACHA UTILIZANDO AGREGADOS DO
MUNICIPIO DE ALEGRETE E CONCRETO ASFALTICO**

**Alegrete
2019**

VITOR CHERVENSKI ESCOBAR

**COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO DE MISTURA SMA EFETUADA COM
ASFALTO MODIFICADO POR BORRACHA UTILIZANDO AGREGADOS DO
MUNICÍPIO DE ALEGRETE E CONCRETO ASFALTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Diego Arthur
Hartmann

Alegrete

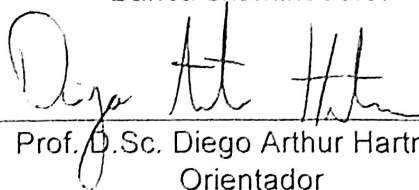
2019
VITOR CHERVENSKI ESCOBAR

COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO DE MISTURA SMA EFETUADA COM
ASFALTO MODIFICADO POR BORRACHA UTILIZANDO AGREGADOS DO
MUNICÍPIO DE ALEGRETE E CONCRETO ASFALTICO

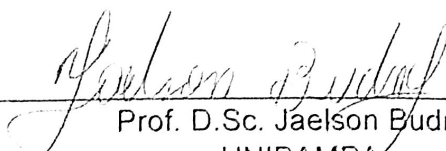
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Civil da Universidade Federal do
Pampa, como requisito parcial para
obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 25 de novembro de
2019

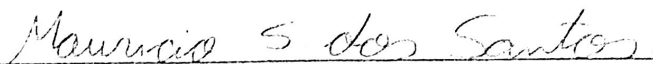
Banca examinadora:



Prof. D.Sc. Diego Arthur Hartmann
Orientador
UNIPAMPA



Prof. D.Sc. Jaelson Budny
UNIPAMPA



Prof. Me. Mauricio Silveira dos Santos
UNIPAMPA

Dedico este trabalho às pessoas que estiveram e estarão ao meu lado.

RESUMO

O trabalho teve por objetivo analisar o desempenho, através das propriedades de módulo de resiliência e resistência à tração de amostras de misturas asfálticas do tipo SMA (*Stone Matrix Asphalt*), ou “Matriz Pétreo de Asfalto”, realizadas com agregados do Município de Alegrete, seguindo requisitos da norma AASHTO MP 8-02/12,5mm. Para auxiliar nessa análise foram utilizadas considerações das referências bibliográficas sobre a relação MR/RT. Primeiramente foram caracterizados os agregados (abrasão Los Angeles, absorção e peso específico) e então, com estes materiais pétreos, moldados corpos de prova de SMA com asfalto borracha, de mistura com granulometria estipulada pelo DNIT (Faixa C) utilizando o mesmo tipo de ligante asfáltico e de amostras extraídas de usina de asfalto, localizada no município de Caçapava do Sul e operada pela Empresa LCM Construção e Comércio, enquadrada na Faixa C do DNIT e com CAP 50/70. Foi empregada a dosagem Marshall na caracterização volumétrica das misturas, para a determinação do teor ótimo das misturas projetadas. Após estas etapas foi feita a comparação do desempenho do SMA diante das duas outras misturas em estudo, e também aos resultados obtidos por Junges (2017) nos ensaios de RT e MR aplicados aos asfaltos misturados e moldados em laboratório (enquadrados na Faixa C com utilização de CAP 50/70 e agregados oriundos da mesma jazida dos outros tipos de asfaltos elaborados laboratorialmente neste trabalho), revelando assim a real melhoria na sua utilização. Quanto ao escoamento a mistura SMA com asfalto borracha se mostrou ótima conforme o ensaio de Schelleberg, regido pela norma EN 12697-18. Para a resistência à tração os valores para as misturas SMA se mostraram inferiores aos das misturas enquadradas na Faixa “C”. Para a relação MR/RT, que indica durabilidade em misturas asfálticas os resultados indicam melhor desempenho da mistura SMA.

Palavras-Chave: SMA; Mistura Asfáltica; Borracha.

ABSTRACT

The objective of this work was to analyze the performance, through the properties of modulus of resilience and tensile strength of samples of asphalt mixtures of type SMA (Stone Matrix Asphalt), or made of aggregates of the Municipality of Alegrete, following AASHTO MP 8-02 / 12.5mm requirements. To assist in this analysis, considerations from the references on the MR / RT relationship were used. First the aggregates (Los Angeles abrasion, absorption and specific weight) were characterized and then, with these stone materials, molded SMA specimens with rubber asphalt, mixed with DNIT stipulated particle size (Range C) using the same type of binder. asphalt and samples extracted from an asphalt plant, located in the city of Caçapava do Sul and operated by the Company LCM Construção e Comércio, classified in DNIT C-strip and with CAP 50/70. Marshall dosing was employed in the volumetric characterization of the mixtures to determine the optimal content of the designed mixtures. After these steps, the performance of the SMA was compared to the two other mixtures under study, and also to the results obtained by Junges (2017) in the RT and MR tests applied to the mixed and molded asphalts in the laboratory (framed in Strip C using 50/70 and aggregates from the same deposit as the other types of asphalts elaborated in this work), thus revealing the real improvement in their use. Regarding the runoff, the SMA mixture with rubber asphalt proved to be optimal according to the Schelleberg test, governed by EN 12697-18. For tensile strength, the values for SMA mixtures were lower than those for mixtures in the "C" range. For the MR / RT ratio, which indicates durability in asphalt mixtures the results indicate better SMA mix performance.

Keywords: SMA; Asphalt; Mix; Asphaltic; Rubber.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| RESUMO | 4 |
| ABSTRACT | 5 |
| 1 INTRODUÇÃO | 11 |
| 1.1 Objetivos | 12 |
| 1.1.1 Objetivos Gerais | 12 |
| 1.1.2 Objetivos Específicos | 12 |
| 1.2 Justificativa | 13 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 15 |
| 2.2 Asfalto borracha | 21 |
| 2.3 Parâmetros e conceitos do SMA | 21 |
| 2.4 Ensaios de desempenho | 27 |
| 2.4.1 Módulo de Resiliência | 27 |
| 2.4.2 Resistência à tração por compressão diametral | 28 |
| 3 METODOLOGIA E MATERIAIS | 30 |
| 3.1 Agregados | 30 |
| 3.1.1 Mistura Laboratorial | 30 |
| 3.1.2 Mistura da usina | 35 |
| 3.2 Ligante asfáltico | 36 |
| 3.2.1 Mistura laboratorial | 36 |
| 3.2.2 Mistura da usina | 36 |
| 3.3 Usina de asfalto | 37 |
| 3.4 Determinação do teor de ligante | 37 |
| 3.5 Dosagem Marshall | 38 |
| 3.5.1 Massa Específica Aparente (Gmb) | 40 |
| 3.5.2 Massa Específica Máxima (Gmm) | 42 |
| 3.5.3 Relação entre “Volume de Vazios” e “Teor Ótimo de Ligante” | 45 |
| 3.6 Metodologia Shellemberg | 45 |
| 3.7 Ensaios de Desempenho | 47 |
| 3.7.1 Módulo de Resiliência | 47 |

| | |
|--|-----------|
| 3.7.2 Resistência à tração por compressão diametral | 47 |
| 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS | 48 |
| 4.1 Caracterização Volumétrica das Misturas | 48 |
| 4.2 Caracterização Mecânica das Misturas | 49 |
| 4.3 Viabilidade econômica..... | 53 |
| 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 54 |
| 5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros | 54 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 56 |
| ANEXO A – Fluxograma de atividades | 59 |
| Anexo B – Curva de variação da viscosidade por temperatura..... | 60 |
| Anexo C – Temperaturas recomendadas de usinagem e compactação, orientações de uso do ligante..... | 61 |
| Anexo D – Caracterização, qualidade e orientações de armazenamento do ligante..... | 62 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO – Associação Norte-americana de Especialistas Rodoviários e de Transportes

CA – Concreto Asfáltico

CNT – Confederação Nacional dos Transportes

CP – Corpo de Prova

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DER – Departamento de Estradas de Rodagem

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

MR – Módulo de Resiliência

RT – Resistência à Tração

SMA – Stone Matrix Asphalt

TCC – Trabalho de Conclusão de Curso

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Frota total de veículos por região – Brasil – 2008/2018..... | 19 |
| Tabela 2 – Faixas granulométricas do SMA pela AASHTO MP 8-02..... | 26 |
| Tabela 3 – Granulometria do material de enchimento..... | 27 |
| Tabela 4 – Porcentagens de material passante nas peneiras..... | 31 |
| Tabela 5 – Porcentagens passantes e retidas utilizadas para Faixa C do DNIT.... | 32 |
| Tabela 6 - Porcentagens passantes e retidas utilizadas para o SMA..... | 33 |
| Tabela 7 – Valores referentes ao ensaio de Abrasão Los Angeles..... | 34 |
| Tabela 8 – Granulometria e quantidades dos agregados da Pedreira Andrezza.. | 35 |
| Tabela 9 – Caracterização do CAP utilizado na Usina..... | 36 |
| Tabela 10 – Massa específica aparente para Faixa “C”..... | 41 |
| Tabela 11 – Massas específicas aparentes pela “SMA MP 8-02/12,5mm”..... | 41 |
| Tabela 12 – Massas específicas máximas para as misturas SMA..... | 44 |
| Tabela 13 – Massas específicas máximas para as misturas enquadradas na Faixa “C”..... | 44 |
| Tabela 14 – Módulos de resiliência para os tipos de mistura..... | 50 |
| Tabela 15 – Resistências à tração para os tipos de mistura..... | 51 |
| Tabela 16 – Relação MR/RT..... | 52 |
| Tabela 17 – Valores totais de usinagem..... | 53 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|---|----|
| Gráfico 1 - Evolução da extensão das rodovias federais pavimentadas no Brasil.. | 16 |
| Gráfico 2 - Percentual de rodovias federais pavimentadas por região no Brasil..... | 16 |
| Gráfico 3 - Extensão de rodovias federais pavimentadas de pista dupla por região no Brasil por região..... | 17 |
| Gráfico 4 - Densidade da malha rodoviária pavimentada por País..... | 17 |
| Gráfico 5 - Ranking de qualidade das rodovias dos países da América do Sul em 2016..... | 18 |
| Gráfico 6 – Exemplos de faixas granulométricas de CBUQ e SMA..... | 23 |
| Gráfico 7 – Curva granulométrica de trabalho..... | 31 |
| Gráfico 8 – Faixa de trabalho enquadrada na Faixa C do DNIT..... | 33 |
| Gráfico 9 – Faixa de trabalho enquadrada para SMA..... | 34 |
| Gráfico 10 – Granulometria de projeto para a mistura da usina..... | 35 |
| Gráfico 11 – Determinação do teor ótimo de ligante para o SMA..... | 48 |
| Gráfico 12 – Determinação do teor ótimo de ligante para o asfalto enquadrado na Faixa C, com CAP 50/70..... | 49 |
| Gráfico 13 – Módulos de resiliência das misturas..... | 50 |
| Gráfico 14 – Resistências à tração das misturas..... | 51 |

1 INTRODUÇÃO

Segundo a Confederação Nacional dos Transportes (CNT 2018), o Brasil tem apenas 12,4% da malha rodoviária com pavimento, apresentando densidade muito baixa quando comparada com países de extensão similar. São 25,1 km de rodovias pavimentadas para cada 1000 m², enquanto que a Rússia apresenta 54,3 km, a China 421,6 km e os Estados Unidos 437,8 km.

Também de acordo com a CNT (2018), em Boletim Estatístico, a participação das rodovias em transportes de cargas no Brasil é superior a 60%. Sendo assim, o Modal Rodoviário, responsável pelo desenvolvimento logístico dos principais setores da economia do País, influencia nos custos e prazos da grande maioria dos produtos consumidos ou produzidos pela população.

A expansão da malha rodoviária pavimentada não acompanha o ritmo de crescimento da frota de veículos. De julho de 2008 à junho de 2018, a frota cresceu 82,4% enquanto a extensão das rodovias federais apresentaram crescimento de apenas 8,4% (CNT, 2018).

No 8º Encontro de Logística e Transportes da Fundação das Indústrias de São Paulo (Fiesp), a diretora executiva de transportes da Câmara de Comércio dos Estados Unidos, Janet Kavinoky expôs a importância do investimento em infraestrutura de transporte, mostrando que a organização criou índices de desempenho que medem o que o sistema de transporte faz para a economia, com base em estatística e qualidade. Assim foi constatado que: “Para cada ponto a mais no índice de desempenho, Produto Interno Bruto (PIB) aumenta 0,3%” (Fiesp, 2013).

Desta maneira é bastante clara a necessidade de investimento em quantidade e qualidade de rodovias no Brasil. Com segurança na rodagem e durabilidade, para aumentar a competitividade do País e conforto dos usuários. Uma solução para a melhoria da qualidade das vias é a utilização de materiais alternativos e diferentes granulometrias que venham a entregar maior vida útil, um exemplo é o SMA.

O SMA é um revestimento asfáltico, usinado a quente, que aumenta o contato entre grãos graúdos, a mistura apresenta alta porcentagem de agregados graúdos, desta maneira são formados altos volumes de vazios que devem ser preenchidos por um mástique asfáltico, constituído pela mistura de fração de areia, fíler, ligante asfáltico e fibras (BERNUCCI *et al*, 2008).

Conforme Balbo (2007), o ligante empregado para a mistura SMA é geralmente CAP modificado por polímeros, ou borracha, que tenha características de reduzir deformações plásticas e melhorar o comportamento à fadiga. Além disso, o autor menciona que as fibras são necessariamente utilizadas para absorver os excessos de ligante, evitando o seu escorrimento, durante o transporte e a exsudação da mistura quando aplicada na pista. A textura superficial resultante é mais rugosa e estabelece uma rede de micro drenagem que evita a formação de lâminas d'água durante períodos chuvosos, melhorando aderência e contato dos pneus com os agregados da superfície.

As características do SMA vêm a entregar maior segurança aos usuários, aliadas à maior durabilidade e melhor resistência ao impacto, garantida pelo contato grão à grão, que são maiores e apresentam maior atrito. Para garantir estas boas características e desempenho, devem ser atendidos parâmetros de qualidade para agregados e da mistura já moldada em laboratório ou aplicada na pista.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos Gerais

Este trabalho tem como propósito avaliar o emprego do SMA, com suas contribuições para durabilidade e segurança das rodovias da região sul do estado do Rio Grande do Sul, testando e comparando alguns parâmetros de desempenho através de ensaios laboratoriais.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Avaliar o escorrimento da mistura, através da Metodologia Schellemborg;
- b) Avaliar o comportamento das misturas através dos ensaios de Resistência à Tração e Módulo de Resiliência;
- c) Comparar as misturas laboratoriais com uma mistura asfáltica comumente utilizada na região de Alegrete/RS, obtida direto em usina;
- d) Comparar e analisar os resultados dos diferentes tipos de asfalto, verificando as vantagens do uso do SMA.

1.2 Justificativa

Para Bernucci *et al.* (2008), o SMA é aplicável em: vias com alta frequência de caminhões; interseções; áreas de carregamento e descarregamento de cargas; rampas, pontes, paradas de ônibus, faixa de ônibus, pistas de aeroporto; estacionamentos; portos.

As principais características de desempenho do SMA são: boa estabilidade a elevadas temperaturas, boa flexibilidade a baixas temperaturas, elevada resistência ao desgaste, boa resistência à derrapagem devido à macro textura da superfície de rolamento, redução do spray ou cortina de água durante a chuva, redução do nível de ruído ao rolamento (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Segundo Ramos (2015), pesquisas mostram que o SMA é um revestimento asfáltico com boa resistência ao trincamento por fadiga ou reflexão de trincas e ao afundamento em trilha de roda, sendo aplicado inclusive em obras de pavimentação aeroportuários.

Para Silva *et al.* (2015), uma tendência que se observa em vários países, é a substituição do CBUQ pelo SMA (Stone Matrix Asphalt), uma mistura asfáltica de revestimento usinada a quente que apresenta graduação descontínua, que tem apresentado bons resultados quanto à durabilidade, resistência a deformações permanentes, atrito superficial, entre outros. Pistas que são bastante solicitadas, como de aeroportos, já empregam este tipo de asfalto, a exemplo do Aeroporto Internacional de Brasília.

O custo benefício também pode vir a ser bastante atrativo, quando considerado o início de intervenções no concreto asfáltico usinado à quente em 5 anos ou de 7,5 anos em experiências do exterior, sendo que o valor comumente aceitável no meio técnico brasileiro é de 10 anos para o SMA, mostrando assim que este é mais vantajoso. Isto baseado em estudos desenvolvidos na Alemanha, que indicam o custo anual do CBUQ variando entre 0,45 a 0,65 US\$/m²/ano, e para o SMA de 0,38 a 0,54 US\$/m²/ano (RAMOS, 2015).

É notória a má qualidade dos pavimentos brasileiros, somado ao fato do transporte de cargas ser feito majoritariamente por caminhões através de rodovias, evidenciando a necessidade de suas melhorias. O SMA vem como uma possível alternativa de maior conforto, resistência e durabilidade. Um maior investimento inicial é inevitável para tal, pela mistura exigir maior controle

tecnologia e materiais de qualidade superior, porém a expectativa é que para várias situações este tipo de mistura se mostre mais viável economicamente e socialmente quando comparada ao concreto asfáltico tradicionalmente utilizado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Bernucci *et al.* (2008), uma das primeiras estradas do Brasil começou a ser utilizada em 1560, sendo um caminho aberto para ligar a Capitânia de São Vicente ao Planalto Piratininga. Em 1661 esse caminho foi recuperado, sendo construído o “Caminho do Mar”, permitindo que veículos pudessem trafegar. Hoje a estrada é conhecida como “Estrada Velha do Mar”.

O grande impulso na construção rodoviária aconteceu nas décadas de 1940 e 1950, com a criação do Fundo Rodoviário Nacional, após a implementação do imposto sobre combustíveis líquidos. Na época também foi fundada a Petrobras, em 1953.

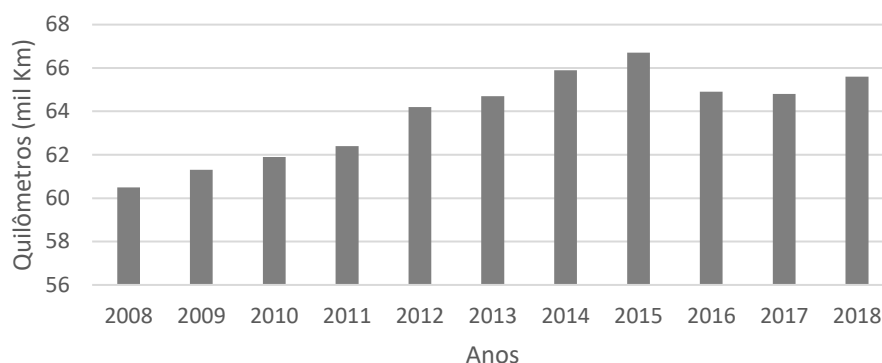
Para Prego (2001), o início da industrialização na execução de pavimentos se deu em 1950, antes disso os métodos eram pouco tecnológicos, como se comprova na execução da Rodovia Presidente Dutra, em 1950, que foi feita em camadas constantes de 35 cm, sendo 20 cm de macadame hidráulico e 15 cm de revestimento em macadame betuminoso, que era dimensionada pela regra “a quantidade de ligante é o que o agregado pede”. Conforme Bernucci *et al.* (2008), o governo militar foi responsável por diversos projetos de infraestrutura, onde destacam-se a Rodovia Transamazônica e a Ponte Rio-Niterói.

Segundo Balbo, existem eventos marcantes na pavimentação do País, como a construção da Rodovia Presidente Castello Branco, em São Paulo no ano de 1967 e a Rodovia Porto Alegre-Osório, no Rio Grande do Sul no ano de 1974. Elas facilitaram a introdução de britas graduadas tratadas com cimento como base dos pavimentos asfálticos.

Para Bernucci *et al.* (2008), o atraso do País em relação aos investimentos na área de infraestrutura, principalmente na pavimentação, pode ser relacionado ao consumo de asfalto. Em 1998 eram consumidas 27 milhões de toneladas, enquanto que no Brasil gastavam-se 2 milhões de toneladas por ano, quantidade que foi reduzida para 1,3 milhões em 2004.

Segundo a Confederação Nacional dos Transportes (CNT 2018), o número de rodovias federais pavimentadas vem crescendo em média 1% ao ano, resultando em 8,4% nos últimos 10 anos. Uma peculiaridade é a redução entre os anos de 2015 e 2016, resultado da transferência de 4500km da União para Estados e Distrito Federal (Gráfico 1).

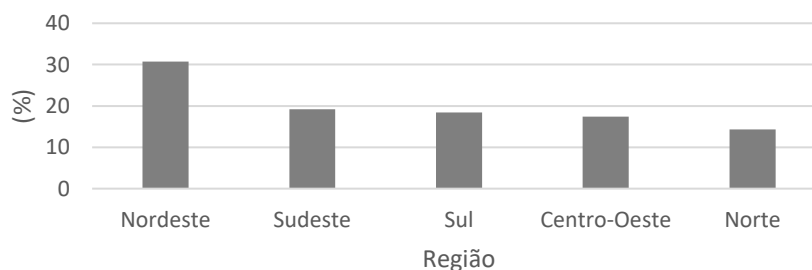
Gráfico 1 - Evolução da extensão das rodovias federais pavimentadas no Brasil



Fonte: CNT (2018, p. 12).

O mesmo relatório aponta a relação de rodovias pavimentadas nas regiões do Brasil (Gráfico 2), são verificadas importantes regiões produtoras agropecuárias e indústrias com baixa participação das rodovias pavimentadas.

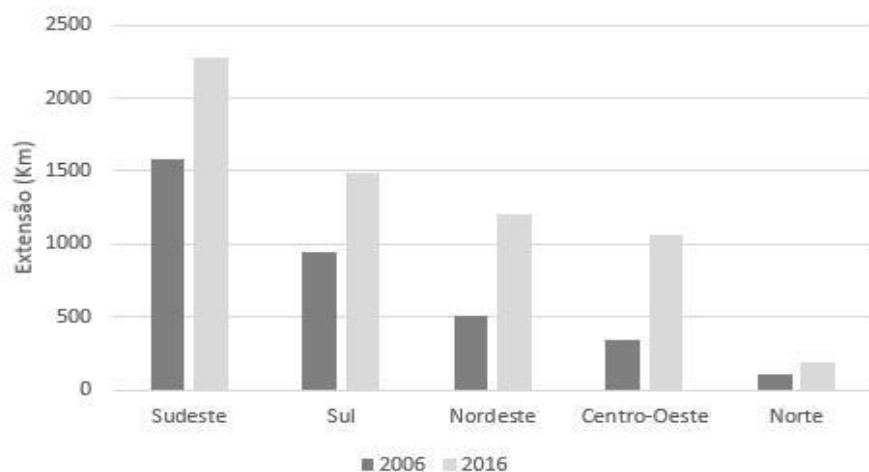
Gráfico 2 - Percentual de rodovias federais pavimentadas por região no Brasil



Fonte: CNT (2018, p. 12).

Em relação à extensão das rodovias federais pavimentadas de pista dupla, de 2006 para 2016, houve um acréscimo de aproximadamente 78,4%, passando de 3.487 km para 6.221 km. Pode-se observar, no Gráfico 3, que a maior concentração dessa classe de rodovia encontra-se nas Regiões Sudeste e Sul do País.

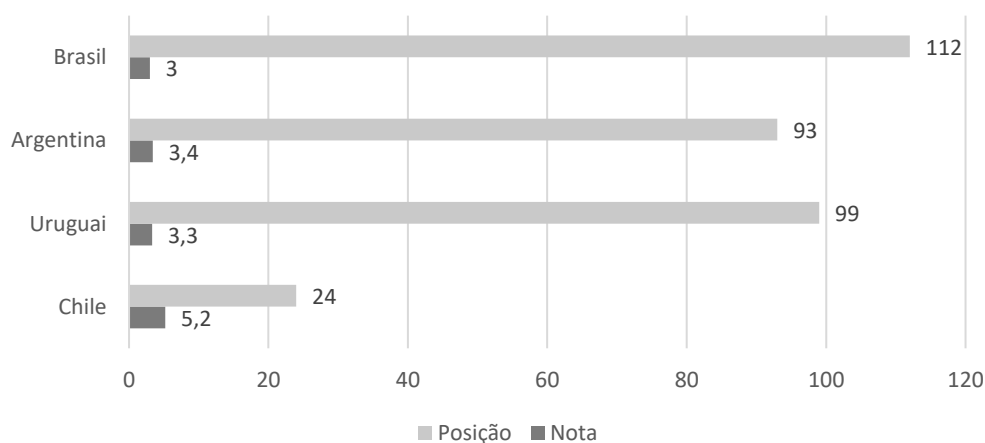
Gráfico 3 - Extensão de rodovias federais pavimentadas de pista dupla por região no Brasil por região



Fonte: CNT (2018, p. 13).

Mesmo sendo observado aumento nos números apresentados, é possível notar a pequena densidade da malha rodoviária pavimentada no Brasil, ainda mais quando comparamos com países de extensões territoriais similares, como fica evidenciado no Gráfico 4. O Brasil possui uma densidade de aproximadamente 25,0 km de rodovias pavimentadas para cada 1.000 km² de área, bastante inferior à densidade rodoviária dos Estados Unidos, da China e da Rússia.

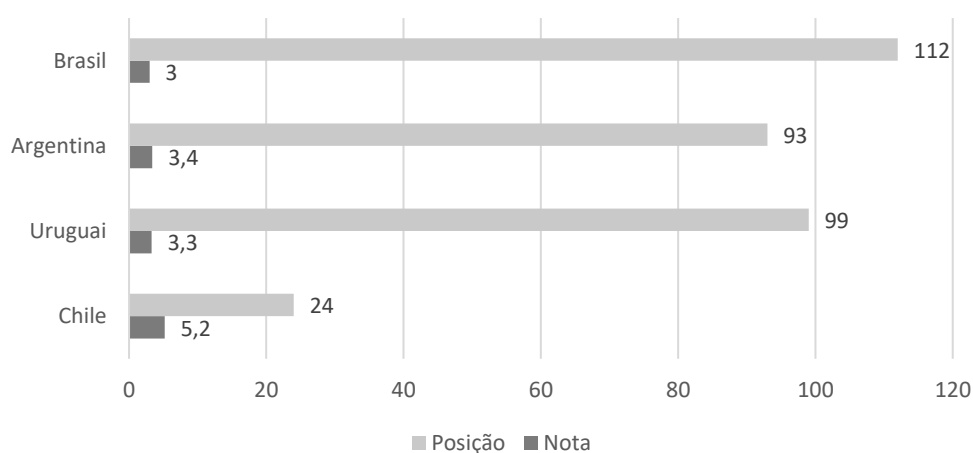
Gráfico 4 - Densidade da malha rodoviária pavimentada por País



Fonte: CNT (2018, p. 14).

Quanto à qualidade, nossas estradas também não apresentam bons resultados, fato evidenciado no resultado do ranking de competitividade global do Fórum Econômico Mundial, nele vemos o Brasil na 112ª posição entre 138 países verificados. Como podemos ver no Gráfico 5 perdendo em qualidade de infraestrutura rodoviária para vizinhos da América do Sul. Foi destacado ainda pela CNT 2018 que algumas rodovias pavimentadas brasileiras não são adequadas ao transporte de pessoas ou de bens.

Gráfico 5 - Ranking de qualidade das rodovias dos países da América do Sul em 2016



Fonte: CNT (2018, p. 14).

Também de acordo com a CNT (2018) o rodoviário vem sendo o principal modal utilizado para escoamento de cargas no Brasil, com participação de mais de 60% nestas movimentações, segundo a mesma Associação, o valor é significativamente superior ao segundo colocado, o meio ferroviário, que em 2017 participava com 22,7%.

O aumento crescente da frota de veículos (Tabela 1) aliado à baixa qualidade dos pavimentos faz com que o número de acidentes nas rodovias aumente.

Tabela 1 - Frota total de veículos por região – Brasil – 2008/2018

| Região | 2008 | 2018 | Crescimento 2008- 2018(%) |
|--------------|------------|------------|---------------------------------|
| Brasil | 54.506.661 | 99.443.198 | 82,40% |
| Norte | 2.205.629 | 5.181.157 | 134,90% |
| Nordeste | 7.330.933 | 17.128.843 | 133,70% |
| Sudeste | 28.619.576 | 48.328.479 | 68,90% |
| Sul | 11.561.066 | 19.550.353 | 69,10% |
| Centro-Oeste | 4.789.457 | 9.254.366 | 93,20% |

Fonte: Relatório CNT (2018, p. 16).

Diante desta situação pode-se dizer que rodovias em boa qualidade proporcionam retorno econômico para a sociedade, seja na operação dos veículos, na economia dos recursos públicos empregados na recuperação e manutenção da malha, ou na redução do número de acidentes.

2.1 Estrutura de um pavimento asfáltico e métodos de dimensionamento

Segundo Bernucci *et al.* (2008), as estruturas de pavimentos são sistemas de camadas sobre uma fundação, o subleito. O comportamento estrutural deste pavimento irá depender da espessura, rigidez e interação das camadas que venham a constitui-lo. A engenharia de rodovias subdivide as estruturas de pavimentos em rígidas e flexíveis, estas em geral são associadas a pavimentos asfálticos, que são compostos por camada superficial asfáltica (revestimento), apoiada sobre camadas de base, sub-base e reforço de subleito, constituídos por sua vez por materiais granulares, solos ou misturas de solos, sem adição de agentes cimentantes. Dependendo das solicitações da estrutura algumas camadas podem vir a ser desnecessárias e assim excluídas.

O conforto e a segurança do trânsito são garantidos pela função estrutural e funcional das camadas que constituem o pavimento. A eficiência que o conjunto das inúmeras camadas usufrui para reagir às ações climáticas e aos carregamentos aplicados pelos veículos, sem sofrer deteriorações que coloque em risco a serventia do pavimento, está ligada a função estrutural. As características de conforto e

segurança da superfície da camada deteriorada do pavimento estão associadas com o papel funcional do pavimento (FRANCISCO, 2012).

Pavimento Flexível é constituído por revestimento asfáltico sobre camada de base granular ou sobre camada de base de solo estabilizado granulometricamente. Os esforços do tráfego são absorvidos pelas distintas camadas constituintes da estrutura do pavimento (BALBO, 2011).

Na Figura 1 pode ser visto esquema das camadas constituintes dos pavimentos flexíveis.

Figura 1 – Camadas do Pavimento Flexível



Fonte: Bernucci *et al.* (2008, p. 338).

À medida que as misturas asfálticas envelhecem na pista, a RT aumenta, por outro lado a flexibilidade é perdida, aumentando seu MR. Assim deve-se observar a existência de uma boa relação entre MR e RT para cada tipo de mistura, não havendo relação universal, mas sim diferente para cada composição granulométrica e ligante empregado (BERNUCCI *et al.*, 2008)

O atual método de dimensionamento de pavimentos utilizado no Brasil, conhecido como método do DNER, tem como principais parâmetros de entrada o ISC (Índice de Suporte Califórnia) e o número N (número de solicitações da carga de 8,2 t que um pavimento será). Utilizando-se tais parâmetros protege-se excessivamente o pavimento contra o cisalhamento, porém não é levado em consideração a fadiga do revestimento asfáltico, principal patologia encontrada nas rodovias brasileiras nos dias atuais. Além disso, não é considerado no método o cálculo de tensões, deformações e deflexões na estrutura que podem levar ao aparecimento de fissuras. Com isso, surgiram conceitos mecânicos que, através de softwares, utilizam-se da Teoria da Elasticidade para determinação da resposta do pavimento às cargas as quais é submetido e que levam ao surgimento de defeitos (FRANCO, 2007).

2.2 Asfalto borracha

Para Silva (2008), asfalto borracha é a mistura de cimento asfáltico de petróleo com pedaços de pneu de borracha moída e aquecidos. Neste processo são utilizados aproximadamente 20% de borracha, 78% de CAP e 2% de óleo queimado. O processo de utilização da borracha como agregado (via seca) não tem trazido vantagens significativas. As vantagens descritas para a borracha misturada no CAP seriam: Diminuição da Sensibilidade Térmica; Aumento da Longevidade da Mistura; Aumento da Aderência; e Redução do Ruído.

O uso da borracha em conjunto com o CAP aumenta o ponto de amolecimento o que acarreta menos perdas voláteis e assim obtêm-se um envelhecimento mais lento, com menor sensibilidade térmica. Também contribui para o aumento da longevidade da mistura através da ação do carbono preto constituinte da borracha na ação contra a oxidação. Ponto de amolecimento é a temperatura na qual o asfalto começa a se tornar líquido, quando ele está nesse estado existe maior número de perdas de voláteis (esses dão flexibilidade ao CAP), o que acelera o envelhecimento (SILVA, 2008).

Segundo Bernucci et al. (2008) uma forma de se incorporar os benefícios dos polímeros ao ligante asfáltico, ao mesmo tempo reduzindo passivos ambientais, é utilizando borracha de pneus inservíveis nas misturas asfálticas. Esses benefícios seriam quanto à deformação permanente, trincas térmicas, trincas de fadiga e envelhecimento (SHELL, 2003, apud BERNUCCI *et al.*, 2008).

2.3 Parâmetros e conceitos do SMA

O SMA, nome dado a um tipo de mistura asfáltica de alto desempenho desenvolvido na Alemanha em 1968, sendo que em alemão, significa splitt mastix asphalt e em inglês, stone satrix asphalt. Inicialmente, na década de 70, o SMA foi utilizado para combater afundamentos em trilha de roda e danos provocados pela rolagem de pneus com pinos de inverno, porém sofreu um declínio após a proibição do uso desse tipo de pneu na Alemanha, devido ao seu custo elevado de material e de aplicação. Na década de 80, os afundamentos por trilha de roda reapareceram como um grande problema na Alemanha devido ao aumento na pressão dos pneus, do uso de super-single (conceito de pneus extralargos, para substituir conjuntos de pneus duplos em reboques e semi-reboques), da carga por eixo e do volume de

tráfego e desde então, as misturas do tipo SMA começaram a ser empregadas novamente após passarem por uma evolução tecnológica (SILVA, 2005).

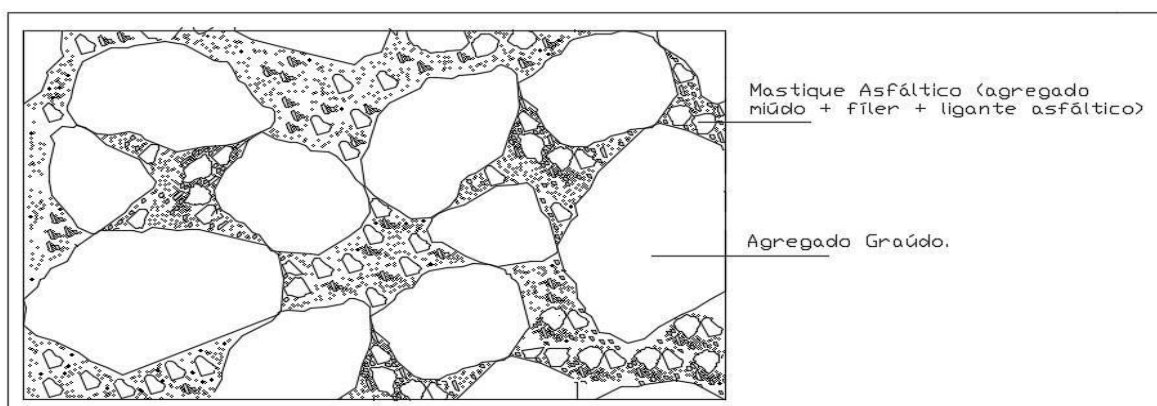
No Brasil, o primeiro serviço de pavimentação com aplicação de SMA foi executado em 2000 na reabilitação do autódromo de Interlagos, em São Paulo/SP, para realização da etapa Brasil do circuito de Fórmula 1 (BELGINI *et al.*, 2000, apud RANGEL, 2015).

Em agosto de 2001 foi construído um trecho experimental de SMA na curva mais fechada e perigosa da Via Anchieta, onde foi apresentado grande sucesso e superioridade no desempenho funcional e estrutural em relações às outras tentativas de solução (REIS *et al.*, 2002, apud BERNUCCI *et al.*).

Desde então outros trechos vêm sendo empregados, com graduações alemãs ou norte americanas. Sendo os estados de São Paulo e Minas Gerais os mais recentes a receberem pavimentos do tipo SMA (RANGEL, 2015).

O SMA é um revestimento asfáltico usinado a quente, concebido para maximizar o contato entre os agregados graúdos, aumentando a interação grão/grão. A mistura se caracteriza por conter uma elevada porcentagem de agregados graúdos (70-80% retido na peneira N°04). Devido a esta particular graduação, forma-se um grande volume de vazios entre os agregados graúdos. Esses vazios, por sua vez, são preenchidos por uma mistura (mastique asfáltico) constituída pela fração areia, fíler, ligante asfáltico e fibras, conforme ilustrado na Figura 2. As fibras são geralmente orgânicas (de celulose) ou minerais, e são adicionadas durante a usinagem para evitar segregação da mistura em seu transporte, facilitar a aplicação e evitar o escorrimento do ligante asfáltico (NAPA, 1999).

Figura 2 – Composição Esquemática do SMA



Fonte: Autoria Própria, adaptado de Balbo

Segundo Bernucci *et al.* (2008), SMA é rico em ligante asfáltico, com consumo em geral sendo entre 6,0 e 7,5%. Tendem a ser impermeáveis, com volume de vazios que varia de 4 a 6% em pista (BERNUCCI *et al.*, 2008).

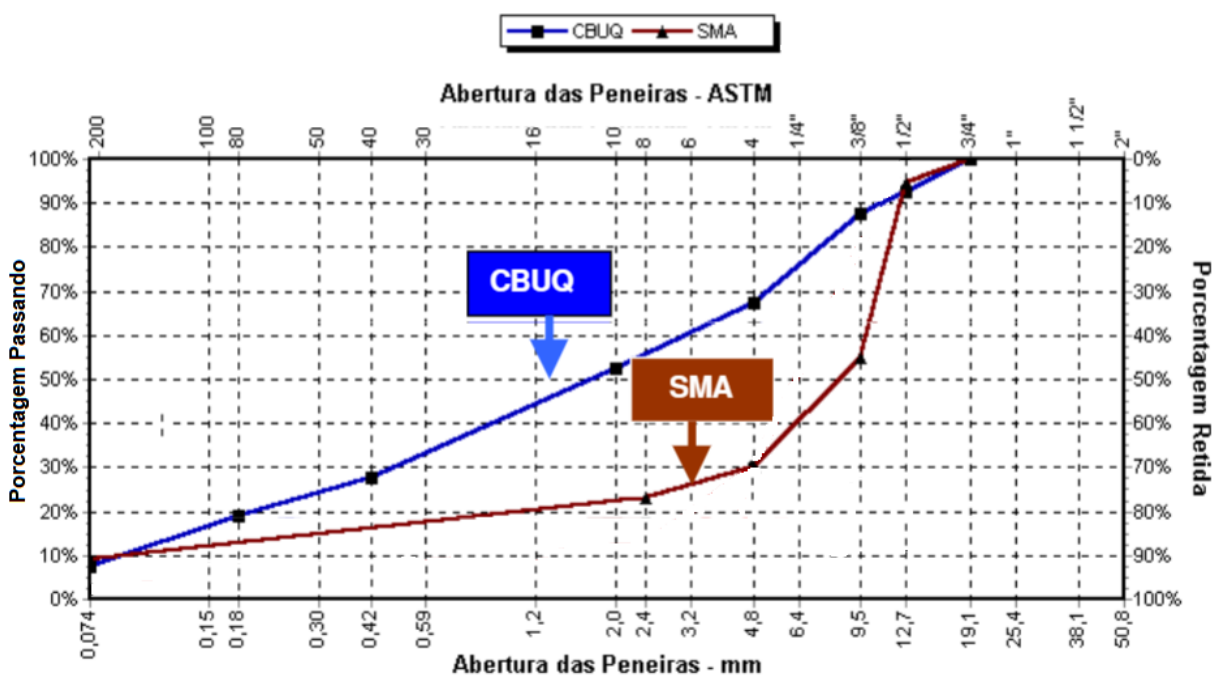
Na Figura 3 e Gráfico 6, são vistas as faixas granulométricas da mistura SMA em comparação com uma de Concreto Asfáltica e outra da CPA, nelas se pode ver a maior quantidade de agregados graúdos e o “salto” que a curva granulométrica faz, por conta de haver poucos agregados com “tamanho médio”.

Figura 3 – Composições granulométricas comparativas entre um SMA e um CA



Fonte: Horst Erdlen apud Bernucci *et al.* (2008, p. 169).

Gráfico 6 – Exemplos de faixas granulométricas de CBUQ e SMA



Fonte: Betunel (2008).

A mistura SMA se trata de um CBUQ, mas com várias diferenças, fabricada com grãos de distribuição menos uniforme de agregados, contando com mais agregados graúdos e poucos finos. É necessária maior cubicidade dos agregados britados, para que, após a compactação seja proporcionado o contato face a face dos grãos. O ligante empregado é convencionalmente um CAP modificado com polímeros, pelas suas características de redução de deformação plástica (melhoria de coeficiente de restituição elástica) e melhoria no comportamento à fadiga das misturas asfálticas. O uso de CAP modificado com borracha é também possível. As fibras servem para absorver excessos de ligante, evitando escorrimento durante transporte e exsudação da mistura na aplicação em pista (BALBO, 2007).

Um parâmetro bastante importante na preparação de mistura asfáltica do tipo SMA é o “escorrimento”, que pode ocorrer de forma demasiada devido ao alto volume de vazios entre os agregados graúdos (BERNUCCI, *et al.*, 2008).

O teste de escorrimento do ligante é geralmente feito através do método de Schellenberg, que também pode ser designado como método do copo, que consiste em se avaliar a percentagem do ligante escorrido da mistura (MIRANDA *et al.*, 2010).

Segundo a norma europeia EN 12697-18, valores de até 0,2% do peso retido no béquer, a mistura é ótima para escorrimento. O teste consiste em executar a mistura asfáltica no teor ótimo de ligante, separar 1kg, coloca-la em um béquer e deixar a mesma repousar em estufa durante o tempo e temperatura de envelhecimento, após essas etapas a mistura é retirada do recipiente e em seguida realizada a pesagem da quantidade de ligante que ficou aderida às paredes do béquer.

Para Pazinato (2014), a metodologia Schellenberg revela que o SMA formulado com asfalto borracha tem desempenho bom, inclusive superior ao formulado com adição polimérica e com fibra de celulose, quanto ao escorrimento. Por esse motivo, se o asfalto borracha for utilizado, é possível excluir o aditivo estabilizador (no caso fibra de celulose) e asfalto modificado por polímero pelo asfalto borracha. Em seu trabalho foi encontrado o valor de 0,19% para SMA com asfalto borracha, enquanto que para a mistura tradicional de SMA, com asfalto polimérico e agente estabilizante de fibra de celulose foi de 0,21%.

Para o DER-SP (2006), um bom dimensionamento de SMA deve garantir o contato grão a grão dos agregados graúdos, isso é garantido quando os vazios da fração graúda do agregado, na mistura compactada, são menores ou iguais aos

vazios da fração graúda do agregado compactado. Para isso a equação 1 e equação 2 são utilizadas:

Equações 1– Vazios do agregado compactado

$$VC_{ADRC} = \left(\frac{GCA \times \gamma_w - \gamma_s}{GCA \times \gamma_w} \right) \times 100 \quad \dots(1)$$

Equação 2 – Vazios do agregado na mistura compactada

$$VC_{MIX} = 100 - \left(\frac{GMB}{GCA} \times PCA \right) \quad \dots(2)$$

Onde:

“VC_{ADRC}” - vazios da fração graúda do agregado compactado, %;

“ γ_s ” - massa específica aparente da fração graúda do agregado seco compactado, g/cm³ - conforme DNER ME 153(11);

“ γ_w ” - massa específica da água – 0,998 g/cm³;

“GCA” - densidade aparente da fração graúda do agregado, conforme DNER ME 81(12);

“VC_{MIX}” - vazios da fração graúda do agregado na mistura compactada, %;

“GMB” - densidade aparente da mistura compactada, conforme DNER ME 117(13); “PCA” - índice de grãos do agregado em relação ao peso total da mistura.

“GMB” – peso da fração graúda do agregado.

A especificação norte-americana do SMA segue a norma da AASHTO MP 8-02, recomendando três faixas – Tabela 2. Tanto norte-americanos como alemães, especificam para abrasão Los Angeles $\leq 30\%$, porém existem casos em que a abrasão excedeu 50% para os agregados britados e obteve-se sucesso. As faixas com diâmetro nominal máximo de 19mm e 12,5mm são até o momento as mais empregadas nos Estados Unidos. A faixa com tamanho nominal máximo de 9,5mm tem sido a adotada mais recentemente e há uma tendência de aumentar seu emprego nos próximos anos AASHTO MP 8-02, 2009.

Tabela 2 – Faixas granulométricas do SMA pela AASHTO MP 8-02

| Peneira (mm) | Faixas | | |
|--------------|--------------------------------|----------|-----------|
| | Porcentagem em massa, passando | | |
| | SMA 0/11S | SMA 0/8S | SMA 0/8S |
| 25 mm | 0 – 100 | - | - |
| 19 mm | 90 – 100 | 100 | - |
| 12,5 mm | 50 – 88 | 90 - 99 | - |
| 9,5 mm | 25 - 60 | 50 - 85 | 100 - 100 |
| 4,75 mm | 20 - 28 | 20 - 40 | 70 - 95 |
| 2,36 mm | 16 – 24 | 16 - 28 | 30 - 50 |
| 1,18 mm | - | - | 20 - 30 |
| 0,6 mm | - | - | 0 - 21 |
| 0,3 mm | - | - | 0 - 18 |
| 0,075 mm | 8 – 11 | 8 - 11 | 8 - 11 |

Fonte: Bernucci *et al.* (2008).

Quanto ao ligante a Norma norte-americana não é restritiva, permitindo o uso de asfaltos convencionais ou modificados. Recomendando-se a aplicação de fibras durante a usinagem para evitar a segregação da mistura durante o transporte, facilitar a aplicação e evitar o escorrimento do ligante asfáltico.

O Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER-SP) também estabelece uma série de requisitos de qualidade para a fabricação da mistura de asfalto SMA. Esses requisitos são distribuídos conforme explica-se a seguir.

Para agregados graúdos: a) desgaste Los Angeles igual ou inferior a 30%, conforme NBR NM 51/1; b) quando obtidos por britagem de pedregulhos, 90% em massa dos fragmentos retidos na peneira nº 4, de 4,8 mm, devem apresentar no mínimo uma face fragmentada pela britagem; c) índice de forma, superior a 0,5 e porcentagem de partículas lamelares inferior a 10%, conforme NBR 6954/1989; d) os agregados utilizados devem apresentar perdas inferiores a 12% quando submetidos à avaliação da durabilidade com sulfato de sódio, em cinco ciclos, conforme DNER ME 089 (2006).

Para agregados miúdos: areia e/ou pó de pedra, apresentando partículas individuais resistentes, sem torrões de argilas ou outras substâncias que venham a prejudicar; material de enchimento (fíler) deve ser de natureza mineral, finamente

dividido, cimento Portland até 2%, cal extinta, pó de calcário, etc. O fíler deve estar seco e sem grumos. Na tabela 3 são apresentados os limites para fíler.

Tabela 3 – Granulometria do material de enchimento

| Peneira de malha quadrada | | % em massa passante |
|---------------------------|-------|------------------------|
| ASTM | mm | |
| n° 80 | 0,42 | 100 |
| n° 40 | 0,18 | 95 - 100 |
| n° 200 | 0,075 | 65 - 100 |

Fonte: DER-SP. Especificações Técnicas (2007, p.5)

Finalmente, para o projeto de SMA, o Quadro 1 apresenta as características requeridas da mistura pelo DER-SP.

Quadro 1 - Características requeridas da mistura pelo DER-SP

| Características | Método de Ensaio | Parâmetros |
|---|---|----------------------------|
| % de Vazios Totais | | 4 |
| Vazios do Agregado Mineral – VAM (%) | | ≥ 17 |
| Vazios da fração graúda do agregado na mistura compactada – VCA_{MIX} (%) | - | ≤ VCA_{DRC} ¹ |
| Porcentagem de fibras de celulose | - | 0,3 a 1,5 |
| Escorrimento na temperatura de usinagem, máximo, % | ASTM D 6390 ⁽¹⁵⁾ ou AASHTO T 305 ⁽¹⁶⁾ ou "ensaio de Schellenberg" | 0,3 |
| Resistência à Tração por Compressão Diametral Estática a 25°C, mínima, MPa | NBR 15087 ⁽¹⁷⁾ | 0,6 |

¹ vazios da fração graúda do agregado compactado.

Fonte: DER-SP. Especificações Técnicas (2007, p.7).

2.4 Ensaios de desempenho

2.4.1 Módulo de Resiliência

O primeiro estudioso a fazer a relação entre deformações recuperáveis (resiliência) com as fissuras surgidas nos revestimentos asfálticos foi Francis Hveem, que adotou o termo “resiliência”, sendo este definido como “energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações” (HVEEN, 1995).

Realiza-se o ensaio de Módulo de Resiliência (MR) a partir da aplicação de cargas repetidas no plano diametral vertical de corpos-de-prova cilíndricos regulares.

A carga gera tensões de tração transversalmente ao plano onde são aplicadas as cargas. É gerado um deslocamento diametral recuperável na direção horizontal correspondente à tensão gerada, que por sua vez, é medido por sensores (BERNUCCI et al., 2008).

Os corpos de prova utilizados para o ensaio são cilíndricos, com 100 mm de diâmetro e 63,3 mm de altura, quando moldados no compactador Marshall. O experimento é governado pela Equação 3.

Equação 3 – Deformação de tração no ensaio de módulo de resiliência

$$\epsilon_X = \frac{1}{MR} * (\sigma_X - \mu * \sigma_Y) \quad \dots(3)$$

Onde:

ϵ_X = deformação de tração no diâmetro horizontal;

σ_X = tensão horizontal;

σ_Y = tensão vertical;

μ = coeficiente de Poisson;

MR = módulo de resiliência

2.4.2 Resistência à tração por compressão diametral

Desenvolvido pelo professor Lobo Carneiro no Rio de Janeiro para concreto de cimento Portland, se configura na aplicação de duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão em um cilindro que geram tensões de tração uniformes perpendiculares e ao longo do diâmetro. Desde 1972 este ensaio tem sido utilizado para a caracterização de misturas asfálticas, porém com aplicação da força através de frisos metálicos de carga, curvados e com 12,7mm de largura, ao corpo-de-prova cilíndrico Marshall convencional (BERNUCCI et al., 2008).

O cilindro com solicitações diametraais, causadas pelas cargas de compressão, geram tensão de tração uniforme por toda superfície perpendicular ao diâmetro. A Equação 4 representa estas ações e comportamento:

Equação 4 – Tensão de tração uniforme

$$\sigma_{XX} = \frac{2P}{\pi \cdot D \cdot h} \quad \dots(4)$$

Onde:

σ_{xx} – tensão de tração uniforme na direção-x (positiva);

P– força aplicada por unidade de espessura do cilindro;

R – raio do cilindro;

D – diâmetro do cilindro

3 METODOLOGIA E MATERIAIS

Como já visto o SMA tende à entregar melhor desempenho quanto à propagação de trincas e afundamento de trilho de rodas, entregando maior durabilidade e segurança aos usuários. Como anteriormente comentado, Pazinato (2014) apontou que o asfalto borracha oferece melhor desempenho quanto ao escorrimento que o CAP 50/70 modificado por fibras de celulose. Assim, para este trabalho foi escolhido um ligante modificado por borracha para compor a mistura asfáltica. Para a melhor determinação das metodologias e materiais empregados no seguinte trabalho foi elaborado fluxograma de atividades, que se encontra no Anexo A.

As atividades foram divididas em: moldagem de corpos de prova, coleta de amostras da usina; avaliação de indicadores de desempenho (módulo de resiliência e resistência à tração); análise e comparação de resultados.

3.1 Agregados

3.1.1 Mistura Laboratorial

Os agregados foram obtidos na Pedreira Pedra Rosada localizada no município de Alegrete-RS, e passaram por ensaio de granulometria, seguindo a Norma DNER ME 083/98. Estão apresentadas na Tabela 4 as porcentagens de material passante pelas peneiras para o pó de brita, brita 0 e 1. Utilizando estes dados foi traçado o Gráfico 7, onde pode-se obter melhor comparação entre as dimensões dos agregados disponíveis para as misturas com as requeridas pelas faixas indicadas para o SMA e Faixa C do DNIT.

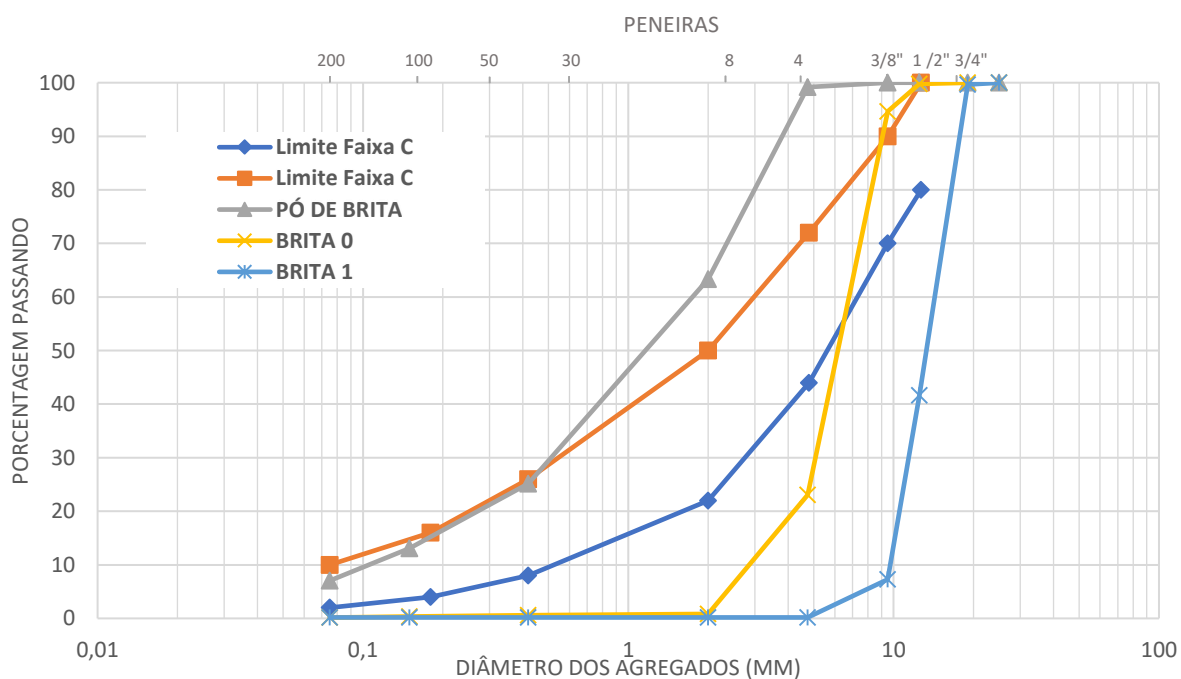
Massa específica e absorção foram determinadas através das normas DNER-ME 081/98 e DNER-ME 194/98, com resultados de 2,730 g/cm³ e 2,01% para massa específica média e absorção do agregado graúdo, respectivamente. Para o agregado miúdo foi determinada a massa específica de 2,826 g/cm³.

Tabela 4 – Percentagens de material passante nas peneiras

| Peneira | | % Passando | | |
|---------|------|-------------|---------|---------|
| Malha | N° | Pó de brita | Brita 0 | Brita 1 |
| 25 | 1" | 100 | 100 | 100 |
| 19 | 3/4" | 100 | 100 | 99,68 |
| 12,5 | 1/2" | 100 | 99,75 | 41,63 |
| 9,5 | 3/8" | 100 | 94,63 | 7,3 |
| 4,75 | 4 | 99,15 | 23,06 | 0,18 |
| 2 | 10 | 63,35 | 0,81 | 0,18 |
| 0,42 | 40 | 25,16 | 0,6 | 0,18 |
| 0,15 | 100 | 13,11 | 0,35 | 0,18 |
| 0,075 | 200 | 7,04 | 0,16 | 0,18 |
| Fundo | - | 0 | 0 | 0 |

Fonte: Elaboração própria.

Gráfico 7 – Curva granulométrica de trabalho



Fonte: Elaboração própria

Nota-se que os agregados não se enquadram nas Faixas Granulométricas “C” do DNIT e na “SMA MP 8-02/12,5mm” da AASHTO pela falta de finos, assim foi separado todo material necessário para realizar as misturas por meio das peneiras. No Gráfico 8 é apresentada a faixa de trabalho empregada para atender à faixa limite “C”, enquanto que no Gráfico 9 é vista a faixa de trabalho utilizada no enquadramento à faixa “SMA MP 8-02/12,5mm”. Nas tabelas 5 e 6 observa-se as porcentagens de materiais retidos e passantes utilizadas na execução das misturas.

Tabela 5 – Porcentagens passantes e retidas utilizadas para Faixa C do DNIT

| ABERTURA | % PASSANDO | | UTILIZADA | RETIDO (%) |
|-------------|---------------|-----|-----------|------------|
| | | | | |
| 19,1 | 100 | | | |
| 12,7 | 80 | 100 | 84 | 16 |
| 9,5 | 70 | 90 | 74 | 11 |
| 4,8 | 44 | 72 | 49 | 25 |
| 2 | 22 | 50 | 30 | 19 |
| 0,42 | 8 | 26 | 12 | 16 |
| 0,18 | 4 | 16 | 5 | 8 |
| 0,075 | 2 | 10 | 3 | 2 |
| PASS. 0,075 | | | | 3 |

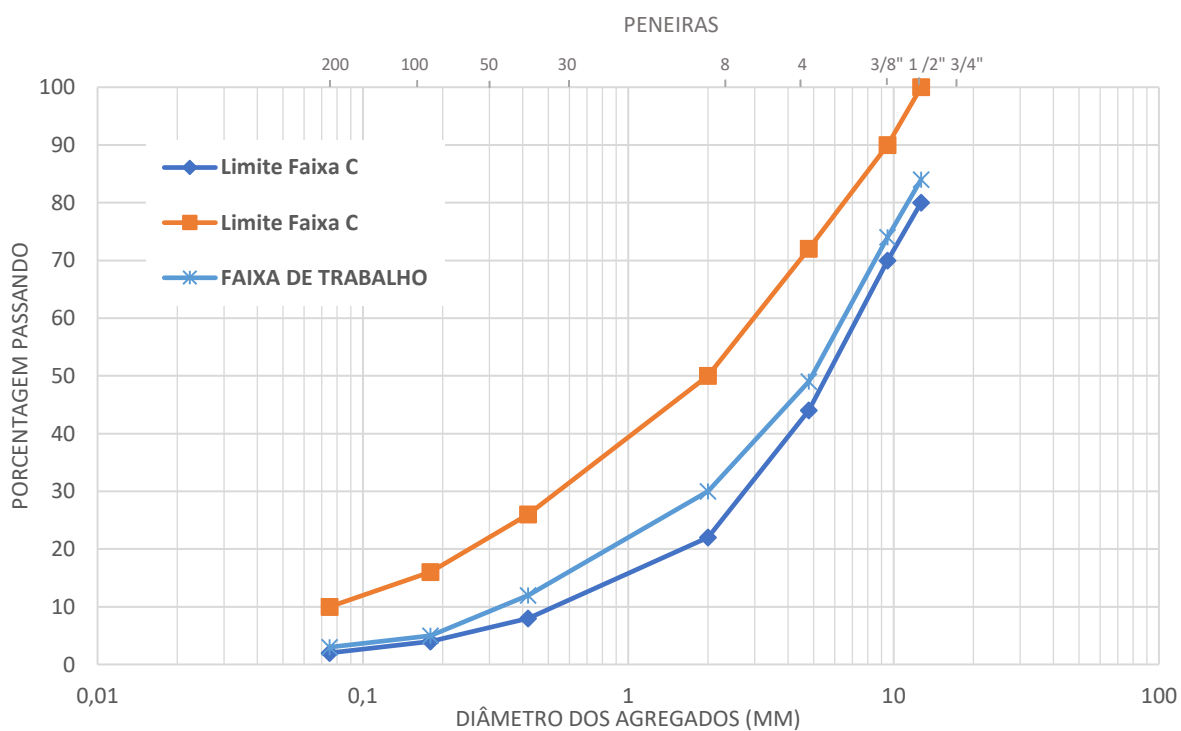
Fonte: Elaboração própria.

Tabela 6 - Porcentagens passantes e retidas utilizadas para o SMA

| ABERTURA | % PASSANDO | | UTILIZADA | RETIDO (%) |
|----------|------------|----|-----------|------------|
| | | | | |
| 19 | 100 | | | |
| 12,5 | 90 | 99 | 91 | 9 |
| 9,5 | 50 | 85 | 54 | 37 |
| 4,75 | 20 | 40 | 36 | 18 |
| 2,36 | 16 | 28 | 22 | 14 |
| 1,18 | - | - | 16 | 6 |
| 0,6 | - | - | 13 | 4 |
| 0,3 | - | - | 12 | 2 |
| 0,075 | 8 | 11 | 9 | 1 |

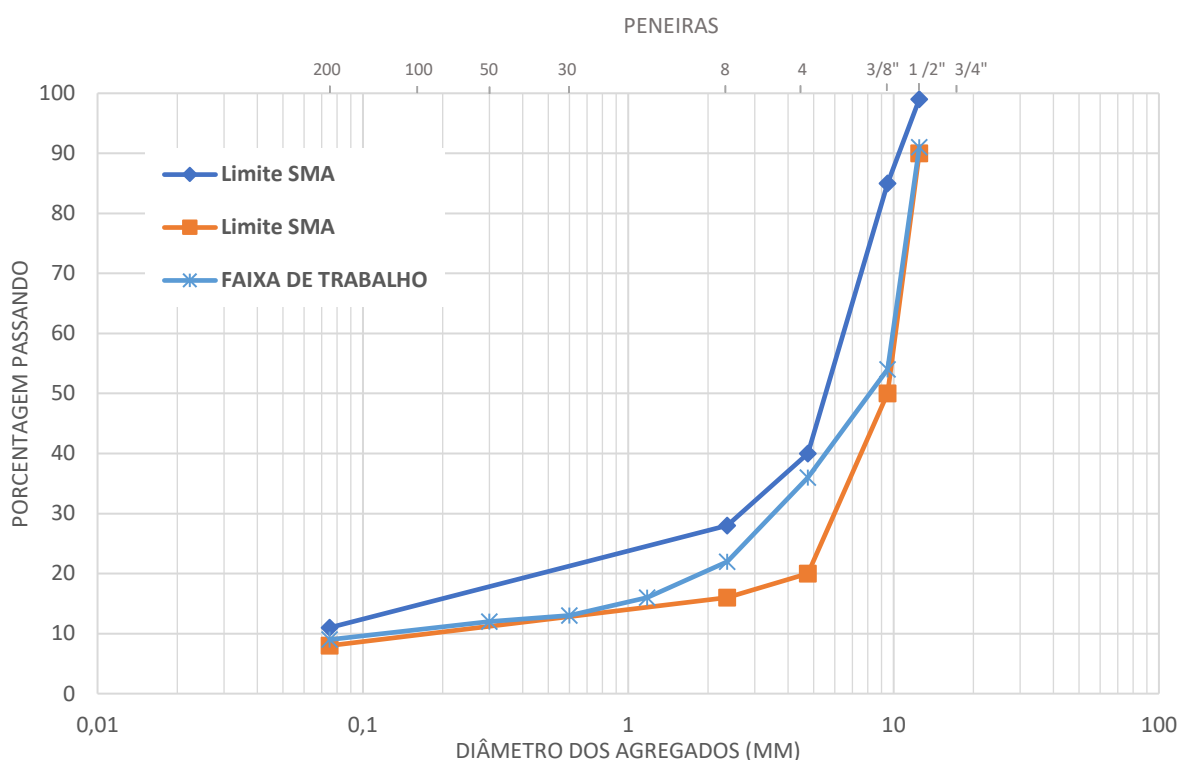
Fonte: Elaboração própria.

Gráfico 8 – Faixa de trabalho enquadrada na Faixa C do DNIT



Fonte: Elaboração própria

Gráfico 9 – Faixa de trabalho enquadrada para SMA



Fonte: Elaboração própria.

Por meio da norma NBR 7211:2009, enquadrando os agregados na “Graduação C” da mesma, foi possível determinar o desgaste por Abrasão Los Angeles. Onde verificou-se um desgaste de 16,05%, abaixo dos 30% máximos recomendados pela AASHTO. Na Tabela 4 pode-se observar os valores referentes ao ensaio.

Tabela 7 – Valores referentes ao ensaio de Abrasão Los Angeles

| FAIXA (mm) | | QUANTIDADE (g) | TOTAL PESADO (g) | VELOCIDADE (RPM) | ROTAÇÕES NECESSÁRIAS | TEMPO DE ENSAIO (MIN) | AL (%) |
|------------|--------|----------------|------------------|------------------|----------------------|-----------------------|--------|
| PASSANTE | RETIDO | | | | | | |
| 9,5 | 6,3 | 2501 | 4860 | 31 | 500 | 16,13 | 16,05 |
| 6,3 | 4,8 | 2502,2 | | | | | |

Fonte: Elaboração própria.

3.1.2 Mistura da usina

Os agregados utilizados na usinagem são oriundos da Pedreira Andrezza – Vila Nova do Sul, que apresenta formações calcárias em sua composição. Na tabela 8 observa-se a granulometria dos agregados e quantidades utilizadas na mistura especificada pela Faixa C do DNIT.

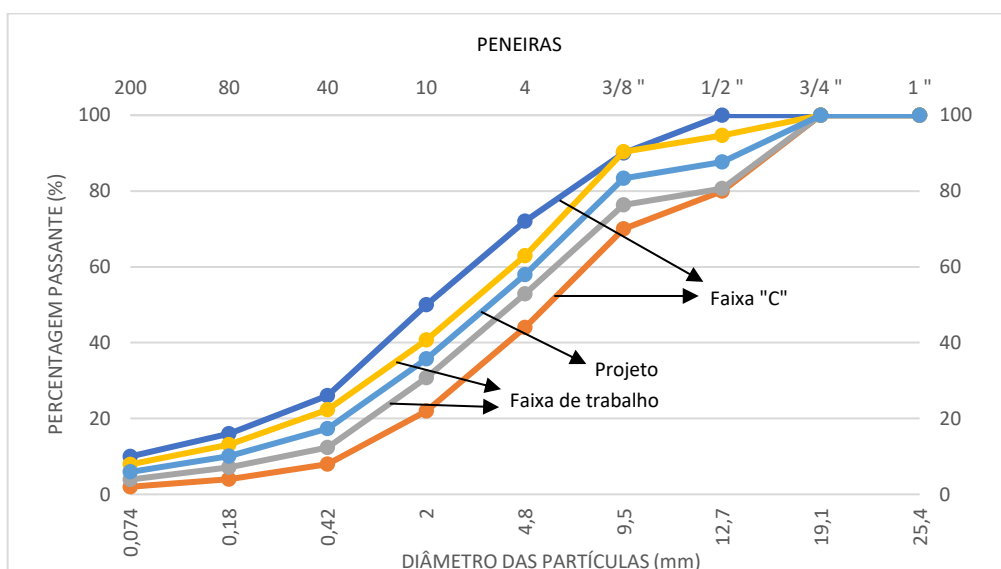
Tabela 8 – Granulometria e quantidades dos agregados da Pedreira Andrezza.

| MISTURA | % BRITA 3/4" | | | | % BRITA 3/8" | | | | % PÓ+PED. 3/16" | | | | Total da mistura (%) | Faixa Especificada (%) | | Faixa de Trabalho (%) | | | | |
|---------|---------------------|---|------|---|---------------------|-------|---|------|---------------------|------|-------|---|----------------------|------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|-------|-------|------|
| | 0,17 | | | | 0,30 | | | | 0,53 | | | | | Limite Inferior | Limite Superior | Limite Inferior | Limite Superior | | | |
| PENEIRA | % PASSANTE. X FATOR | | | | % PASSANTE. X FATOR | | | | % PASSANTE. X FATOR | | | | | | | | | | | |
| 3/4" | 100,0 | x | 0,17 | = | 17,0 | 100,0 | x | 0,30 | = | 30,0 | 100,0 | x | 0,53 | = | 53,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | |
| 1/2" | 27,2 | x | 0,17 | = | 4,6 | 100,0 | x | 0,30 | = | 30,0 | 100,0 | x | 0,53 | = | 53,0 | 87,6 | 80 | 100 | 80,6 | 94,6 |
| 3/8" | 2,1 | x | 0,17 | = | 0,4 | 100,0 | x | 0,30 | = | 30,0 | 100,0 | x | 0,53 | = | 53,0 | 83,4 | 70 | 90 | 76,4 | 90,4 |
| Nº 4 | 0,5 | x | 0,17 | = | 0,1 | 17,5 | x | 0,30 | = | 5,3 | 99,2 | x | 0,53 | = | 52,6 | 57,9 | 44 | 72 | 52,9 | 62,9 |
| Nº 10 | 0,3 | x | 0,17 | = | 0,1 | 1,0 | x | 0,30 | = | 0,3 | 66,8 | x | 0,53 | = | 35,4 | 35,8 | 22 | 50 | 30,8 | 40,8 |
| Nº 40 | 0,2 | x | 0,17 | = | 0,0 | 0,9 | x | 0,30 | = | 0,3 | 32,1 | x | 0,53 | = | 17,0 | 17,3 | 8 | 26 | 12,3 | 22,3 |
| Nº 80 | 0,2 | x | 0,17 | = | 0,0 | 0,5 | x | 0,30 | = | 0,2 | 18,7 | x | 0,53 | = | 9,9 | 10,1 | 4 | 16 | 7,1 | 13,1 |
| Nº 200 | 0,2 | x | 0,17 | = | 0,0 | 0,3 | x | 0,30 | = | 0,1 | 10,9 | x | 0,53 | = | 5,8 | 5,9 | 2 | 10 | 3,9 | 7,9 |

Fonte: LCM Construção e Comércio.

No gráfico 10 observa-se o enquadramento dos agregados da pedreira na Faixa C do DNIT.

Gráfico 10 – Granulometria de projeto para a mistura da usina



Fonte: LCM Construção e Comércio.

3.2 Ligante asfáltico

3.2.1 Mistura laboratorial

O CAP modificado por borracha foi obtido da CBB Asfaltos, produto proveniente de Curitiba, estado do Paraná, mesmo Estado de onde já foram originados ligantes asfálticos para execução de diversos pavimentos na região (Município de Santa Maria), utilizados pela Empresa Della Pascoa. A curva de viscosidade Brookfield foi determinada em laboratório pela CBB Asfaltos, juntamente com temperaturas recomendadas de usinagem e compactação, orientações de utilização, caracterização, qualidade e orientações de armazenamento do ligante. Essas informações são observadas nos anexos A, B e C.

3.2.2 Mistura da usina

O CAP utilizado é oriundo da Refinaria REFAP – Canoas RS, com ensaios realizados na mesma, observam-se os resultados fornecidos pelo distribuidor na Tabela 9.

Tabela 9 – Caracterização do CAP utilizado na Usina

| Característica | Método | Especificação | Resultado | Unidade |
|---|--------|---------------|-----------|---------|
| PENETRAÇÃO | D5 | 50 a 70 | 56 | 0,1 mm |
| PONTO DE AMOLECIMENTO | D36 | 46 min | 50 | grau C |
| VISCOSIDADE BROOCKFIELD 135GC.SP21 20 RPM | D4402 | 274 min | 310 | cp |
| VISCOSIDADE BROOKFIELD150.GC.SP21 | D402 | 112 min | 158 | cp |
| VISCOSIDADE BROOKFIELD 177GC.SP21 20 RPM | D4402 | 57 a 285 | 60 | cp |
| PENETRAÇÃO RETIDA | D5 | 55 min | 73 | % |
| SOLUBILIDADE NO TRICLORETIENO | D2042 | 99.5 min | 99,9 | % massa |
| PONTO DE FULGOR | D92 | 235 min | >236 | grau C |
| ÍNDICE DE SUSCETIBILIDADE TÉRMICA | X 018 | -1,5 a 0,7 | 0,9 | N/A |
| DENSIDADE RELATIVA A 20/4 GRAUS CELSIUS | O 70 | Anotar | 1,002 | N/A |
| AQUECIMENTO A 177 °C | X 215 | NESP | NESP | N/A |
| nota NESP: NÃO ESPUMA | | | | |

3.3 Usina de asfalto

Localizada no Km 259,300 do município de Caçapava do Sul, trata-se de uma usina móvel Terex Magnum de fluxo contínuo, dosagem por meio de células de cargas que acionam sistema pneumático de abertura e lançamento dos materiais dos silos, secagem por contrafluxo que oferece maior produção e facilidade em manter a alta temperatura, com produção máxima girando em torno de 80 toneladas por hora. Na figura 4 observa-se a usina empregada.

Figura 4 – Usina de asfalto de Caçapava do Sul em funcionamento



Fonte: Autoria própria

3.4 Determinação do teor de ligante

Foram moldados corpos de prova com a granulometria “SMA MP 8-02/12,5mm” da Norma norte-americana AASHTO MP 8-02 e com teores de ligante variando em percentagens crescentes, através da Metodologia Marshall. A percentagem de ligante será variada de 6,5% a 8%, em incrementos de 0,5%. A mínima percentagem de ligante recomendada é de 6,5%, desta maneira foram variadas em 0,5%, até 8%. Foram moldados 3 corpos de prova para cada percentagem de ligante asfáltico. O procedimento foi repetido para mistura asfáltica enquadrada na faixa C do DNIT, com asfalto borracha, porém partindo de 4,5% de ligante, até 6,5%.

3.5 Dosagem Marshall

O método Marshall é um procedimento bastante difundido no Brasil e encontrado em vários laboratórios do País, em que utiliza a compactação por impacto, normatizado pela norma DNER-ME 043/95. Para uso em pavimentação, recomendam-se 75 golpes (com soquete padronizado) em cada face do CP à ser moldado. Para misturas SMA a norma AASHTO MP 8-02 e DER-SP a recomendação é de 50 golpes por face, para evitar a ruptura de agregados, que neste tipo de mistura se apresentam com maior contato entre os grãos.

Inicialmente foi efetuada a pesagem dos agregados, com posterior adição do ligante asfáltico e mistura dos materiais, o que é mostrado na Figura 5.

Figura 5 – Adição de agregados e ligante asfáltico



Fonte: Autoria própria.

Depois de 2 horas na estufa à temperatura de compactação (150°C), o material foi colocado em um cilindro de 100 mm de diâmetro e compactado (figura 6) a altura de aproximadamente 63,5 mm e armazenados ao ar livre por 24 horas, para depois serem desmoldados (Figura 7).

Figura 6 – Compactação dos corpos de prova



Fonte: Autoria própria.

Figura 7 – Desmoldagem dos corpos de prova



Fonte: Autoria própria

3.5.1 Massa Específica Aparente (Gmb)

A realização do ensaio foi regida pela norma DNIT 117/2010, para corpos de prova moldados em laboratório. Onde se pode adquirir a massa específica aparente fazendo-se a relação entre as massas dos corpos de prova em diferentes estados.

Para Bernucci *et al.* (2008), a massa específica aparente é determinada através da mistura asfáltica em seu estado compactado, regida pela Equação 5.

Equação 5 – Massa específica aparente

$$Gmb = \frac{Ms}{Msss - Msss\ sub} * 0,9971 \quad \dots(5)$$

Onde:

0,9971 = consideração do peso específico da água a 25°C;

Ms = massa do CP no estado seco (g);

Msss = massa do CP com superfície saturada seca (g);

Msss sub= massa do CP no estado submerso (g).

Inicialmente os corpos de prova foram pesados no estado seco (Ms), após foram submergidos na água com temperatura de 25°C, determinando a massa do corpo de prova submerso (Msss sub), por último foram secos com toalha para determinação da massa do CP com superfície saturada seca (Msss). Alguns desses procedimentos são mostrados na Figura 8.

Figura 8 – Obtenção da massa específica aparente em laboratório

a) Pesagem dos corpos de prova no estado submerso



b) Secagem superficial dos corpos de prova



Fonte: Autoria própria

Nas Tabela 10 e 11 são apresentados os resultados das massas específicas aparentes dos CPs enquadrados na Faixa “C” do DNIT e “SMA MP 8-02/12,5mm” da AASHTO.

Tabela 10 – Massa específica aparente para Faixa “C”

| % de ligante | MEA=Gmb (g/cm ³) |
|--------------|------------------------------|
| 4,5 | 2,356 |
| 5 | 2,381 |
| 5,5 | 2,380 |
| 6 | 2,392 |
| 6,5 | 2,422 |

Fonte: Elaboração própria

Tabela 11 – Massas específicas aparentes pela “SMA MP 8-02/12,5mm”

| % de ligante | MEA=Gmb (g/cm ³) |
|--------------|------------------------------|
| 6,5 | 2,355 |
| 7 | 2,361 |
| 7,5 | 2,365 |
| 8 | 2,381 |

Fonte: Elaboração própria

3.5.2 Massa Específica Máxima (Gmm)

De acordo com Bernucci *et al.* (2008), a massa específica máxima teórica é dada pela consideração entre as massas obtidas dos materiais que constituem as misturas asfálticas. Foram seguidos os passos estipulados pela norma ASTM D 2041 (2000) na determinação deste parâmetro, com adequações quanto às massas das misturas asfálticas empregadas, utilizando 0,5kg de mistura asfáltica inserida no kitassato ao invés dos 1,5kg, nos procedimentos. Essas modificações se mostraram necessárias por não haver balança de precisão com capacidade de 10 quilogramas.

Para executar o ensaio foi utilizado um kitassato de 1000ml que primeiramente foi enchido com água e rasado com placa de vidro para obtenção de coeficiente denominada com “B”

Depois pesou-se a quantidade de 500 gramas de mistura asfáltica, para as faixas granulométricas e teores de ligante asfáltico adotados, com colocação dentro do kitassato. Feito isso, foi adicionada água para cobrir a mistura em no mínimo 5 centímetros e aplicado vácuo no conjunto por 15 minutos, expulsando o ar ainda contido entre os agregados e ligante. Após esse período a bomba aplicadora de vácuo foi desligada e desacoplada do kitassato, com posterior colocação de água até completar o recipiente e rasamento do mesmo. O peso do conjunto foi denominado “C”. Assim foi possível determinar o gmm pela Equação 5:

$$gmm = \frac{A}{A+B+C} * 0,9971$$

Onde:

0,9971: consideração do peso específico da água à 25°C;

A: massa da amostra seca ao ar (g);

B: massa do kitassato completo com água;

C: massa do kitassato com amostra de mistura asfáltica completo com água.

Na Figura 9 observam-se algumas das sequências seguidas na execução do ensaio.

Figura 9 – Determinação do “gmm”

a) Separação e desagregação da mistura asfáltica não compactada.



b) Aplicação de vácuo no interior do kitassato



Fonte: Autoria própria

c) Colocação de água até completar o kitassato



Fonte: Elaboração própria

Na Tabela 12 são mostradas as massas específicas máximas obtidas nos ensaios para as misturas SMA, enquanto que na 13 são mostradas as relativas à mistura enquadrada na Faixa “C”. Sendo os valores relativos à média de duas misturas que foram ensaiadas.

Tabela 12 – Massas específicas máximas para as misturas SMA

| % de ligante | gmm (g/cm ³) |
|--------------|--------------------------|
| 6,5 | 2,524 |
| 7 | 2,448 |
| 7,5 | 2,466 |
| 8 | 2,453 |

Fonte: Autoria própria

Tabela 13 – Massas específicas máximas para as misturas enquadradas na Faixa “C”

| % de ligante | gmm (g/cm ³) |
|--------------|--------------------------|
| 4,5 | 2,56 |
| 5 | 2,572 |
| 5,5 | 2,555 |
| 6 | 2,521 |
| 6,5 | 2,508 |

Fonte: Autoria própria

3.5.3 Relação entre “Volume de Vazios” e “Teor Ótimo de Ligante”

Para determinar o teor de ligante ideal para as misturas foram relacionados volumes de vazios somente de 4% para camadas de rolamentos (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Esta relação é comprovada pela Equação 6:

$$Vv = \frac{Gmm - Gmb}{Gmm}$$

Onde:

Vv = volume de vazios (%);

Gmm = massa específica máxima (g);

Gmb = massa específica aparente (g).

Foram preparados quinze corpos de prova com os diferentes teores de ligante para a mistura SMA e também para a enquadrada na Faixa C, totalizando trinta corpos de prova para a definição de pesos e dimensões.

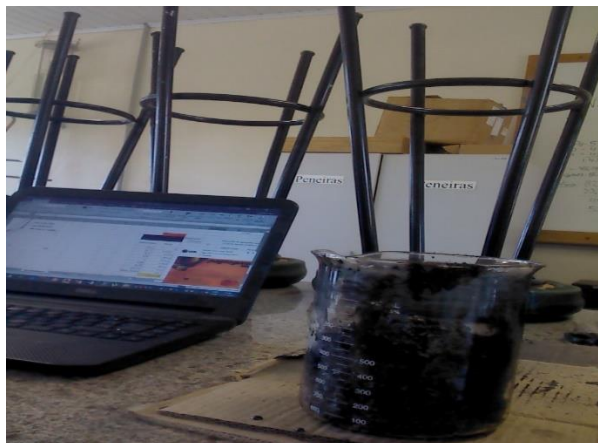
3.6 Metodologia Shelleberg

Este teste foi realizado para a mistura SMA, servindo para verificar seu escorrimento, sendo regido pela norma EN 12697-18. Primeiramente foram preparadas duas misturas asfálticas de 1 quilograma, seguindo a temperatura de mistura do ligante para seu preparo (175°C como indicado pelo fabricante). Após esta etapa, as misturas foram colocadas em dois béqueres e resguardadas em estufa pelo prazo de 1 hora, também na temperatura de mistura indicada para o ligante. A porcentagem de ligante utilizada foi à do teor ótimo (7,73%).

Primeiramente foi adicionado 1,0 Kg de mistura asfáltica no interior do béquer. A mistura foi colocada em estufa, onde permaneceu por 1 hora em temperatura de 175°C. Após este período, a amostra foi descartada, e o béquer contendo resíduos do ligante foi novamente pesado. Na Figura 10 observam-se os procedimentos relatados.

Figura 10 – Procedimento Schelleberg

a) Adição da mistura asfáltica no béquer



b) Colocação do béquer na estufa



c) Pesagem do béquer com resíduo da mistura asfáltica



Fonte: Autoria própria

3.7 Ensaios de Desempenho

3.7.1 Módulo de Resiliência

O ensaio foi realizado em 12 corpos de prova, na Universidade Federal de Santa Maria, sendo 4 CPs de SMA, 4 com asfalto borracha enquadrados na faixa C do DNIT e 4 produzidos em usina asfáltica, com CAP 50/70 e enquadrados na Faixa C do DNIT. Obtendo resultados e comparando-os com os resultados do concreto asfáltico com CAP 50/70 na faixa C do DNIT, obtidos por Junges (2016).

Os CP ficaram condicionados 24 horas a 25°C, sendo então posicionados na prensa do equipamento e assim ficando em contato com o pistão e os transdutores LVDT (*Linear Variable Differential Transducer*), que aplicou as cargas e leu as variabilidades geométricas, respectivamente. A carga foi aplicada pelo tempo 0,1 s e 0,95 s de repouso.

3.7.2 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de RT foi realizado segundo o que indica a norma DNIT 136/2010, em laboratório da Universidade Federal do Pampa, com temperatura de 25°C +- 0,5°C, em prensa calibrada com sensibilidade igual ou menor a 20N, velocidade do êmbolo de 0,8 +- 0,1mm/s. Foram ensaiados 3 corpos de prova para cada tipo de asfalto em análise. A Equação 4 expõe a fórmula que rege esta análise.

Equação 4 – Resistência à tração por compressão diametral

$$\sigma_t = (P / \pi R) \quad \dots(4)$$

Onde:

σ_t = Tensão de tração uniforme na direção x (positiva);

P = Força aplicada por unidade de espessura do cilindro;

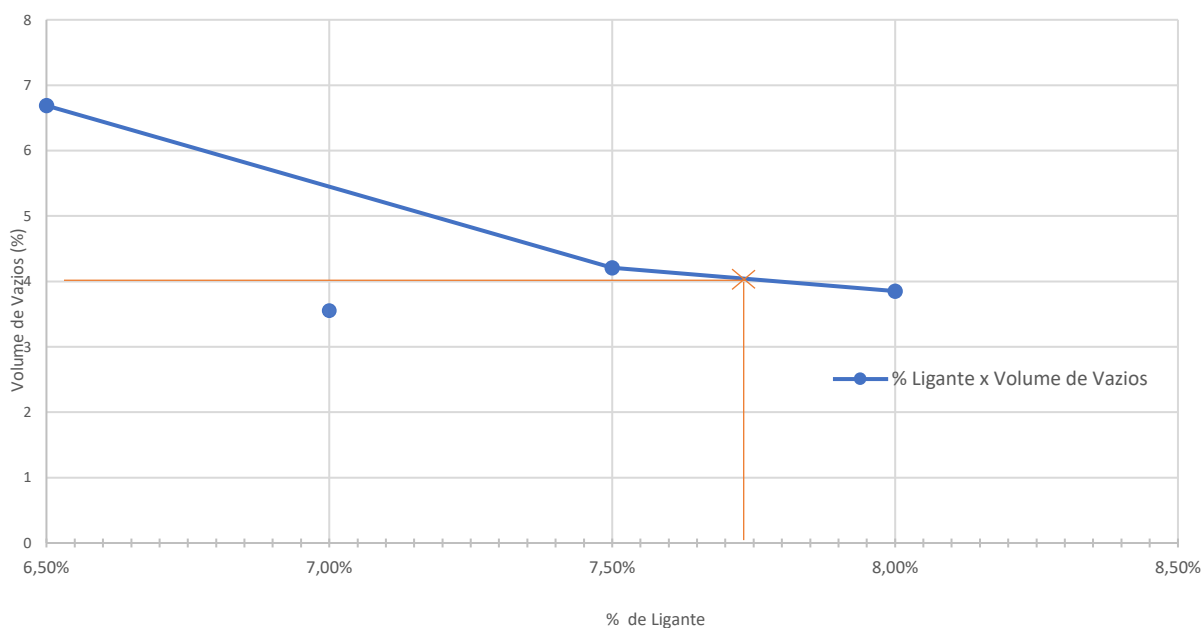
R = Raio do cilindro.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Caracterização Volumétrica das Misturas

Após os ensaios de massa específica aparente e máxima, foi possível determinar o teor ótimo de ligante das misturas, fixando o volume de vazios em 4% e interpolando a quantidade de ligante asfáltico.

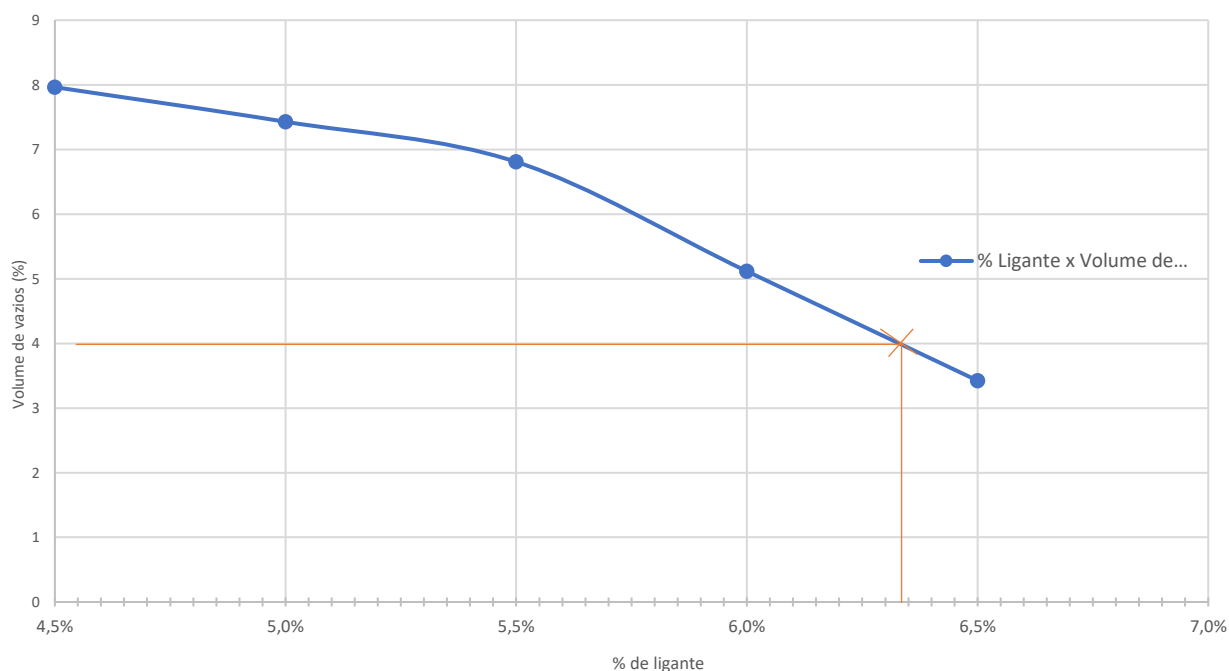
Gráfico 11 – Determinação do teor ótimo de ligante para o SMA



Fonte: Autoria própria

Observa-se que com a fixação do volume de vazios em 4%, pelas relações de massa específicas, o valor do teor de ligante fica em 7,73%. Desta maneira, nos ensaios as misturas para este tipo de asfalto foram moldadas neste teor.

Gráfico 12 – Determinação do teor ótimo de ligante para o asfalto enquadrado na Faixa C, com CAP 50/70



Fonte: Autoria própria

Observa-se que o teor de ligante encontrado foi de 6,33%, sendo este o teor ótimo empregado.

4.2 Caracterização Mecânica das Misturas

Para avaliar o comportamento mecânico das misturas asfálticas SMA, realizaram-se ensaios de módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral em 4 corpos de prova de cada tipo de mistura asfáltica analisada (SMA, Faixa C DNIT com CAP borracha, Faixa C oriundo de usina asfáltica), no teor ótimo de ligante, totalizando 12 corpos de provas.

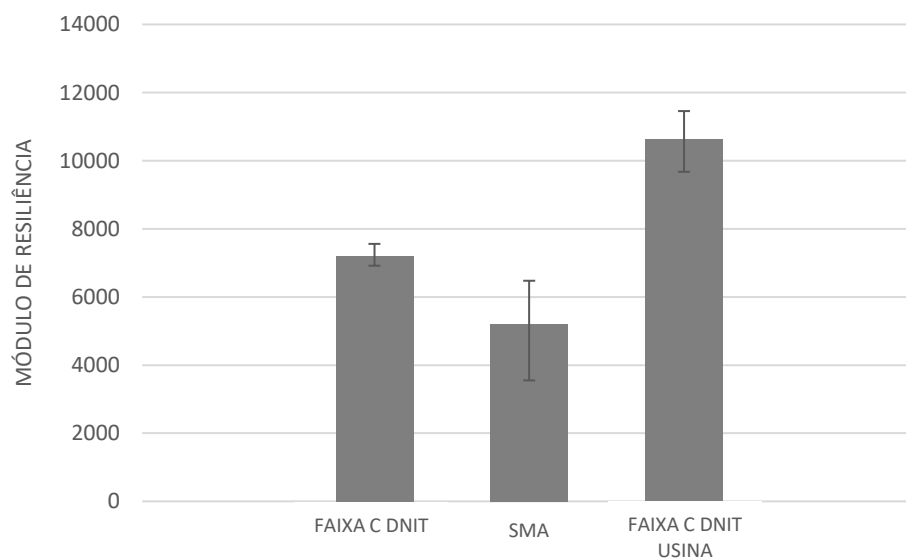
Tabela 14 – Módulos de resiliência para os tipos de mistura

| MISTURA | CP | MR | MR MÉDIO |
|-----------------------------|-------|-------|----------|
| FAIXA C | C I | 7132 | 7195 |
| | C II | 6917 | |
| | C III | 7558 | |
| | C IV | 7172 | |
| SMA | S I | 3551 | 5208 |
| | S II | 6201 | |
| | S III | 4603 | |
| | S IV | 6476 | |
| FAIXA C DNIT - USINA LCM | U I | 10601 | 10618 |
| | U II | 10741 | |
| | U III | 9675 | |
| | U IV | 11457 | |

Fonte: Autoria própria

Os resultados para os módulos de resiliência das misturas em análise são apresentados no Gráfico 13.

Gráfico 13 – Módulos de resiliência das misturas



Fonte: Autoria própria

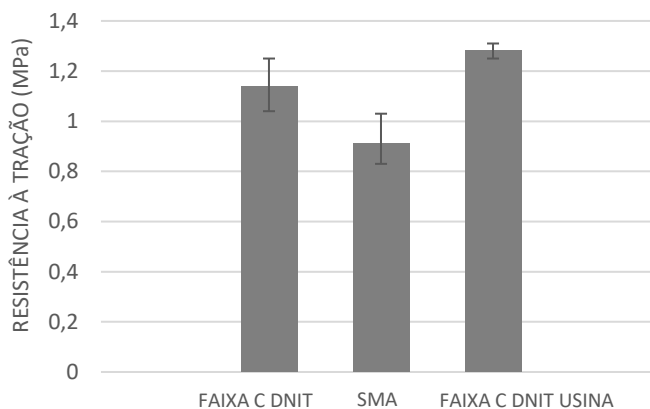
Tabela 15 – Resistências à tração para os tipos de mistura

| MISTURA | CP | RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (Mpa) | RT MÉDIA (MPa) |
|-----------------------------|--------|----------------------------|----------------|
| FAIXA C | C1 | 1,25 | 1,14 |
| | C2 | 1,04 | |
| | C III | 1,18 | |
| | C IIII | 1,1 | |
| SMA | SMA A | 0,87 | 0,91 |
| | SMA B | 0,83 | |
| | S III | 1,03 | |
| | S IIII | 0,9 | |
| FAIXA C DNIT - USINA LCM | U1 | 1,31 | 1,28 |
| | U2 | 1,26 | |
| | U3 | 1,3 | |
| | U4 | 1,25 | |

Fonte: Autoria própria

Os resultados para as resistências à tração das misturas em análise são apresentados no Gráfico 14.

Gráfico 14 – Resistências à tração das misturas



Fonte: Autoria própria

A razão entre MR e RT vem sendo utilizada como indicador da vida de fadiga das misturas asfálticas segundo Bernucci *et al.* (2008), uma vez que a relação agrega informações da resistência e da rigidez. O valor dessa razão é melhor quanto menor for, pois se busca baixa rigidez para retardar o processo de trincamento do revestimento, e uma alta resistência à tração, pois em geral uma maior resistência à ruptura também indica uma maior resistência à fadiga. Neste sentido observa-se que a tendência de maior vida útil é da mistura SMA em análise, o que é comprovado a seguir pela inserção dos dados, incluindo os atingidos por Junges (2017). As relações entre MR e RT podem ser observadas na Tabela 16.

Tabela 16 – Relação MR/RT

| MISTURA | RT MÉDIA (MPa) | MR MÉDIO (MPa) | MR/RT |
|--|----------------|----------------|-------|
| Faixa C | 1,14 | 7.195 | 6289 |
| SMA | 0,91 | 5.208 | 5737 |
| FAIXA C DO DNIT USINA LCM CAÇAPAVA DO SUL | 1,28 | 10618 | 8278 |
| FAIXA C JUNGLES (2017) COM 5,5% DE LIGANTE | 1,25 | 8161 | 6528 |

Fonte: Autoria própria

4.3 Viabilidade econômica

Foram levantados os custos para a usinagem da tonelada de asfalto para as misturas em análise, para os seguintes itens e fornecedores/empreiteiras:

- Usinagem (Construtora Alegretense Ltda)
- CAP 50/70 (Betunel Indústria e Comércio Ltda)
- CAP modificado por borracha (Greca Asfaltos)
- Aplicação (Construbras Construtora Ltda)
- Agregados (Pedreira Andrezza Ltda)

Na Tabela 18 observam-se os resultados dos custos totais por tonelada usinada para cada tipo de mistura em análise.

Tabela 17 – Valores totais de usinagem

| MISTURA | VALOR DE USINAGEM (REAIS/TON) | LIGANTE ASFÁLTICO | | APLICAÇÃO (REAIS/TONELADA) | VALOR AGREGADOS (B1, B0, PÓ DE BRITA) | CUSTO TOTAL (REAIS) |
|--------------------------------|-------------------------------|-------------------|-------------------|----------------------------|---------------------------------------|---------------------|
| | | % CAP | VALOR/TON (REAIS) | | | |
| SMA | 85,00 | 7,6 | 4300 | 55,00 | 32,00 | 496,37 |
| FAIXA C. CAP BORRACHA | 85,00 | 6,3 | 4300 | 55,00 | 32,00 | 440,88 |
| FAIXA C. CAP 50/70 LABORATÓRIO | 85,00 | 5,5 | 3600 | 55,00 | 32,00 | 368,24 |
| FAIXA C. CAP 50/70 USINA | 85,00 | 5,2 | 3600 | 55,00 | 32,00 | 357,54 |

Fonte: elaboração própria

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para encontrar o teor ótimo de ligante de cada mistura, foram analisadas as características volumétricas dos corpos de prova, nos dois tipos de misturas asfálticas projetadas: Faixa C do DNIT e SMA, ambos com CAP modificado por borracha. Os teores encontrados foram de 6,3 e 7,6% de ligante, elevados pelo tipo de asfalto empregado.

Após, foram verificadas as resistências a tração e módulos de resiliência em 4 CPs (para cada tipo de ensaio) moldados para cada um dos tipos de misturas. Estes resultados foram comparados com os de corpos de provas moldados com mistura asfáltica extraída de usina que emprega agregados enquadrados na Faixa C do DNIT e CAP 50/70, com teor ótimo de ligante de projeto de 5,2% e resultados obtidos em trabalho anterior que utilizou a mesma faixa de agregados e mesmo tipo de CAP, porém com teor de 5,5%.

Empregando a consideração sobre a relação MR/RT exposta pela bibliográfica notou-se um melhor desempenho do SMA perante as demais misturas, no que se refere ao desempenho.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

A avaliação de métodos e materiais que venham a aumentar a confiabilidade do SMA com asfalto borracha deve ser realizada para viabilizar a aplicação da mistura em rodovias, são sugestões para trabalhos futuros:

- A principal questão a ser estudada é a quantidade de finos que a mistura demanda, carecendo assim de estudos granulométricos em pedreiras e métodos para obter maiores teores de material passante na peneira 0,075mm, estudos de incorporação de aditivos com granulometria fina podem vir a somar na resolução desta questão.

- Avaliação de provável exsudação, devido ao alto teor de ligante asfáltico.

- Aplicação da mistura em trecho experimental para avaliação do desempenho perante às reais solicitações e métodos de usinagem e transporte do material.

- Mesmo com a metodologia Schellemborg tendo sido aplicada para verificar o escorrimento, é interessante que se faça essa avaliação na prática, realizando o transporte da mistura asfáltica em caminhão caçamba, expondo a mistura à choques,

batidas e cargas oriundas de buracos, frenagens, tracionamentos, entre outras solicitações, ou alguma forma de simular o carregamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO, American Association of State Highway and Transportation Officials, **Rough Roads Ahead, Fix Them Now Or Pay for it Later** – USA, 2009.

AASHTO MP 8-02 R 46.; **Standard Practice for Designing Stone Matrix Asphalt (SMA)** – USA, 2009.

BALBO, J.T.; **Pavimentação asfáltica** - Materiais, Projeto e Restauração. 1ª Edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BALBO, J.T.; **Pavimentação Asfáltica**. 2. ed. Oficina de Textos, 2011.

BAVARESCO, D.; YSHIBA, J.J.; **Projeto de misturas asfálticas SMA conforme a Faixa Granulométrica D11 da Norma Européia**. Artigo: VII Encontro Tecnológico da Engenharia Civil e Arquitetura, 2009.

BERNUCCI, L.B.; DA MOTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.O.; SOARES, J.B.; **Pavimentação Asfáltica** – Formação Básica para Engenheiros.

BETUNEL; **Revestimentos Asfálticos SMA**. 6º Encontro Técnico DER-PR, 2008. Disponível em: <http://www.der.pr.gov.br/arquivos/File/EcontrosTecnicos/6encontroTecnico/SMADERPR.pdf>

COLARES, L.G. **Concessão administrativa**: gerenciamento e manutenção de rodovias por parâmetros de desempenho. Projeto de pesquisa de artigo científico apresentado à Comissão de Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Controle Externo (PGCE) do Instituto Serzedello Corrêa do Tribunal de Contas da União, Brasília, 2011.

CNT - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES. **Relatório gerencial** – 21ª edição – Brasília, 2018.

DAER (RS) – DEPARTAMENTO AUTONOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. **Rede Rodoviária Federal – Divisão em trechos** – VDM 2017, Porto Alegre, 2017.

DER (SP) – DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Especificação Técnica de Concreto Asfáltico tipo SMA**, 2006. Disponível em: ftp://ftp.sp.gov.br/ftpder/normas/ET-DE-P00-031_A.pdf. Acesso em: 30 agosto, 2017.

DNER – ME 043/95. **Misturas asfálticas a quente - Ensaio Marshal: método de ensaio**. Rio de Janeiro. IPR, 1995.

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

DNER-ME 081/98. **Agregados – Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 1998.

DNER-ME 081/195. **Agregados – Determinação da massa específica do agregado miúdo.** Rio de Janeiro, 1998.

DNER-ME 081/194. **Agregados – Determinação da absorção e da massa específica do agregado graúdo.** Rio de Janeiro, 1998.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. Norma DNIT 031/2006 – ES. **Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço.** Disponível em: http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dnit031_2006_es.pdf Acesso em: 30 agosto, 2018.

Encontro da Fundação das Indústrias de São Paulo; **Logística e Transporte**, 8ª edição, São Paulo, 2013.

EN 12697-18 – **Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt.** Part 18: Binder drainage. CEN, European Committee for Standardization, Bruxelas, 2004.

FRANCISCO, A.P.S.; **Comportamento Estrutural de Pavimentos Rodoviários Flexíveis.** Dissertação de Mestrado – Escola Superior de Tecnologia e de Gestão Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, SP, 2012. Disponível em: https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/8011/1/Ana%20Francisco_MEC_2012.pdf. Acesso em: 20/03/2019.

FRANCO, F.A.P.; **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos.** Tese de doutorado. Rio de Janeiro, 2007.

FIESP.; **8º Encontro de Logística e Transportes da Fundação das Indústrias de São Paulo.** Boletim informativo. São Paulo, 2013.

HVEEM, F.N. **Pavement deflections and fatigue failures.** em: ANNUAL MEETING, 34., 1955. Bulletin.

JUNGES, L.B.; **Verificação do potencial de utilização de fibras vegetais em misturas de concreto asfáltico.** Alegrete, 2017.

MIRANDA, Henrique; **Análise comparativa de métodos de ensaio para avaliação do escorrimento, em misturas betuminosas do tipo Stone Mastic Asphalt, segundo a norma europeia EN 12697-18,** Lisboa, Portugal, 2010.

NAPA - National Asphalt Pavement Association. **Design and construction SMA mixtures - State of the practice.** USA, 1999.

PAZINATTO, J.A.; **Estudo comparativo de misturas asfálticas tipo SMA efetuadas com asfalto modificado por polímero e asfalto modificado por borracha.** Campo Mourão, 2014.

PREGO, A.S.S.; **A memória da pavimentação no Brasil.** Associação Brasileira de Pavimentação, Rio de Janeiro, 2001.

RAMOS, F.R.; **Aplicação de SMA em pavimentos aeroportuários** – Estudo de Caso: Aeroporto de Aracaju – SE. Ouro Preto, 2015.

RANGEL, F.; **Aplicação de SMA (Stone Matrix Asphalt) em pavimentos aeroportuários – Estudo de caso: Aeroporto de Aracaju-SE. Dissertação de mestrado.** Ouro Petro, 2015.

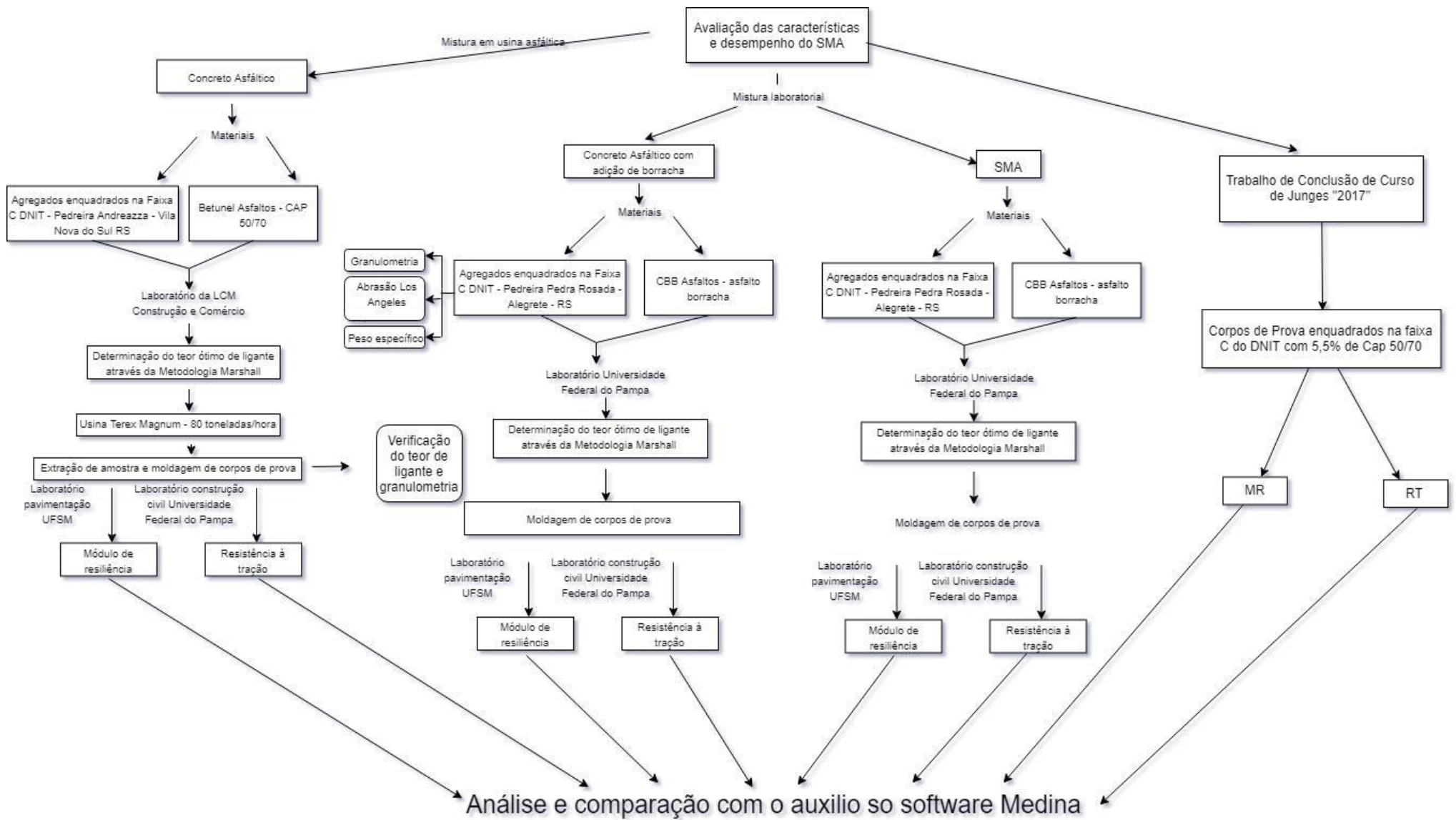
REIS, R.M.M.; BERNUCCI, L.L.B.; ZANON, A.L.; In: Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes; Confederação Nacional do Transporte. (Org.) **Transporte em transformação** VI. 1 ed. Brasília: Universidade de Brasília, 2002. v. 6, p. 163-176.

SILVA, P.F.A.; **Manual de patologia e manutenção de pavimentos.** 2ª Edição. São Paulo. Editora Pini Ltda, 2008.

SILVA, C.C.; GOMES, J.F. (2015). **Análise de Desempenho Funcional e Mecânico do Concreto Asfáltico tipo Stone Matrix Asphalt (SMA) para Pavimentos Aeroportuários.** Trabalho de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

SILVA, P. B., **Estudo em laboratório e em campo de misturas asfálticas SMA 0/8S.** São Paulo, SP. 2005.

ANEXO A – Fluxograma de atividades



Fonte: Autoria própria

Anexo B – Curva de variação da viscosidade por temperatura

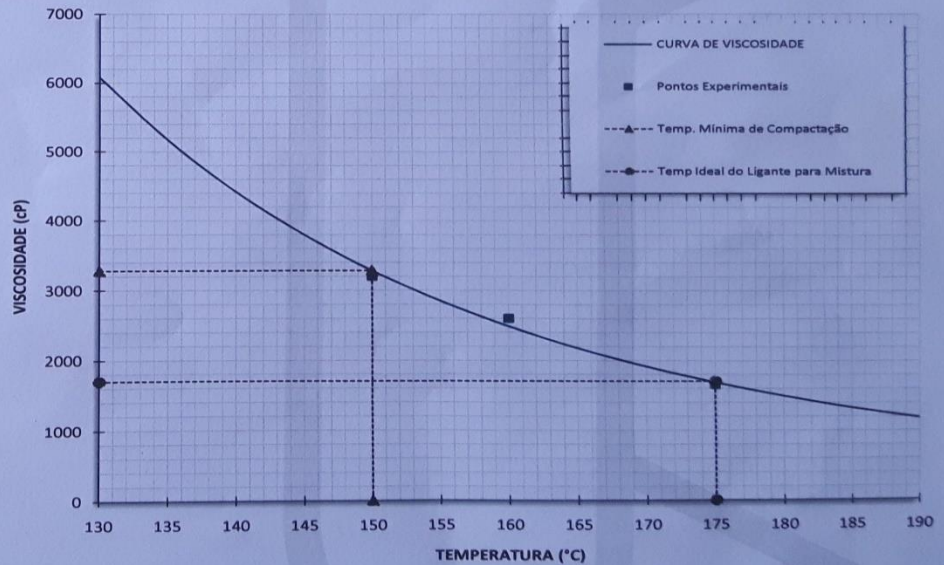
RESULTADOS DO ENSAIO DA AMOSTRA

| VISCOSIDADE BROOKFIELD (NBR 15529) | PONTO DE ENSAIO | VISCOSIDADE MÉDIA | LIMITE | |
|--|---------------------------|----------------------|---------|--------|
| | | | MINÍMIO | MÁXIMO |
| | 150°C - spindle 3, 20 rpm | 3195 | - | - |
| | 160°C - spindle 3, 20 rpm | 2598 | - | - |
| | 175°C - spindle 3, 20 rpm | 1656 | 800 | 2000 |

CURVA DE VARIAÇÃO DA VISCOSIDADE VERSUS TEMPERATURA

| TEMPERATURA | VISCOSIDADE |
|---------------------|-------------|
| 130°C | 6080 cP |
| 135°C | 5167 cP |
| 140°C | 4417 cP |
| 145°C | 3797 cP |
| 150°C | 3280 cP |
| 155°C | 2848 cP |
| 160°C | 2484 cP |
| 165°C | 2175 cP |
| 170°C | 1912 cP |
| 175°C | 1688 cP |
| 180°C | 1495 cP |
| 185°C | 1328 cP |
| 190°C | 1184 cP |
| $r^2 = 0,986314002$ | |

| PARAMETROS DA EQUAÇÃO DA CURVA DE VISCOSIDADE | |
|---|--------------|
| $\mu(T) = a \cdot T^b$ | |
| Onde $\mu(T)$ é a viscosidade em cP e T é a temperatura em °C | |
| a = | 7,9085E+12 |
| b = | -4,311481429 |



Fonte: CBB Asfaltos

Anexo C – Temperaturas recomendadas de usinagem e compactação, orientações de uso do ligante

TEMPERATURAS RECOMENDADAS DE USINAGEM DO LIGANTE ASFÁLTICO

Faixa de Temperatura do Ligante para Mistura: 170°C à 180°C para viscosidade de 1912,3 à 1494,6 cP.
Temperatura Ideal do Ligante para Mistura: 175°C para viscosidade média de 1703,45 cP.

TEMPERATURAS RECOMENDADAS DE COMPACTAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO

Temperatura Mínima de Compactação: 150°C para viscosidade de 3280,3 cP.

ORIENTAÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO

A temperatura do ligante não deve exceder 185°C.
 Temperatura máxima de armazenamento para períodos sem operação: 180°C.

RESPONSÁVEIS TÉCNICOS

Eng.º Luiz Henrique Teixeira - CREA: 39735/D
 Eng.ª Aline Sendeski - CRQ: 9302996/IX | CREA: 15558/D PR

MATRIZ
 CURITIBA PR
 41 3091.2200 | R. João Bettega 3500 CIC 81350-000 Curitiba PR
 cbbasfaltos.com.br

ASSISTÊNCIA TÉCNICA

+55 41 3091 2243
 aline.sendeski@cbbasfaltos.com.br

| | | | | |
|--------------|---------------------|--------------|--------------|--|
| FILIAIS | | | | |
| APUCARANA PR | S. J. DOS CAMPOS SP | ESTEIO RS | CONTAGEM MG | |
| 43 3423.7177 | 12 3911.4178 | 51 3458.3475 | 31 3396.2071 | |

Fonte: CBB Asfaltos

Anexo D – Caracterização, qualidade e orientações de armazenamento do ligante



TYREFLEX AB8

CERTIFICADO DE ANÁLISE

RESOLUÇÃO ANP Nº 39, DE 24.12.2008 - REG. TÉCNICO ANP Nº 05/2008

PRODUTO: Ligante Asfáltico Modificado por Pó de Pneus Inservíveis

CONTROLE DE QUALIDADE Nº 36776

DATA DE FABRICAÇÃO: 03/04/2018

DATA DE EMISSÃO: 20/09/2017

PONTO DE COLETA: Tanque 26

DATA DE COLETA: 04/04/2018 8:00 AM

ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE

| | CARACTERÍSTICAS | UNIDADE | MÉTODO DE ENSAIO | RESULTADOS | LIMITES | |
|---|--|-------------|------------------|------------|---------|--------|
| | | | | | MÍNIMO | MÁXIMO |
| 1 | Ponto de Amolecimento | °C | NBR 6560 | 58,7 | 55 | - |
| 2 | Penetração, 100g, 5 s, 25°C, 0,1mm | 0,1 mm | NBR 6576 | 41 | 30 | 70 |
| 3 | Recuperação Elástica, 10cm, 25°C | % | NBR 15086 | 76 | 50 | - |
| 4 | Viscosidade Brookfield 175°C – spindle 3, 20 rpm | cP | NBR 15529 | 1656 | 800 | 2000 |
| 5 | Ponto de Fulgor | °C | NBR 11341 | 274 | 235 | - |
| 6 | Ensaio de Separação de Fase | Δ P.A. (°C) | NBR 15166 | 4,7 | - | 9 |
| 7 | Massa específica a 25°C | kg/m³ | NBR 6296 | 1,024 | - | - |

QUALIDADE

| | CARACTERÍSTICAS | UNIDADE | MÉTODO DE ENSAIO | QUALIDADE | LIMITES | |
|----|--|---------|------------------|-----------|---------|--------|
| | | | | | MÍNIMO | MÁXIMO |
| 8 | Varição de massa | % | NBR 15235 | 0,3 | -1,0 | 1,0 |
| 9 | Varição do Ponto de Amolecimento | °C | NBR 6560 | -2,7 | - | +10 |
| 10 | Porcentagem de Recuperação Elástica Original, 10cm, 25°C | % | NBR 15086 | 104,1 | 100 | - |
| 11 | Porcentagem de Penetração Original, 25°C | % | NBR 6576 | 57 | 55 | - |

NEGRO DE FUMO

| | CARACTERÍSTICAS | UNIDADE | MÉTODO DE ENSAIO | RESULTADOS | LIMITES | |
|----|--|---------|------------------|------------|---------|--------|
| | | | | | MÍNIMO | MÁXIMO |
| 12 | Teor de Negro de Fumo no Pó de Pneu (Puro) | % | ASTM D5805 | 23,35% | - | - |
| 13 | Teor de Negro de Fumo no Ligante | % | NA | 3,46% | - | - |
| 14 | Fator de Correção da Extração | - | NA | 1,03580 | - | - |

ORIENTAÇÕES DE ARMAZENAMENTO

- A tancagem deve ser limpa a cada 6 meses.
- Temperatura máxima de armazenamento: 180°C.
- Não deixar lastro no tanque.
- Caso ocorram paradas longas no processo de usinagem, o aquecimento do ligante pode ser interrompido e o produto mantido à temperatura
- Quando do reinício dos trabalhos, o processo de reaquecimento deverá ser gradual: sendo que a circulação e a agitação deverão ser reativadas assim que o ligante se mostrar na condição ideal.
- A CBB Asfaltos não se responsabiliza por uso inadequado do produto ou informações enviadas.

ORIENTAÇÕES DE RECEBIMENTO DE CARRETAS

- O recipiente do veículo transportador foi devidamente vistoriado e a carreta segue lacrada.
- A contraprova deverá ser obrigatoriamente coletada na presença do cliente, ou responsável.
- Uma cópia do certificado deve ser entregue juntamente com a nota fiscal e a outra deve retornar para a CBB devidamente preenchida.
- Estes dados refletem os resultados dos controles realizados sobre uma amostra representativa e não eximem o cliente de realizar seu controle no momento do recebimento deste material.
- Este certificado foi emitido eletronicamente pela Garantia de Qualidade e não necessita ser assinado.

ENTREGA DO CERTIFICADO (PREENCHIMENTO OBRIGATÓRIO)

| DATA | HORÁRIO | TEMPERATURA | FROTA |
|---|---------|-------------|-------|
| NOME LEGÍVEL E ASSINATURA DO MOTORISTA | | | |
| NOME LEGÍVEL, ASSINATURA E RG/CPF DO RESPONSÁVEL PELO RECEBIMENTO | | | |

RESPONSÁVEIS TÉCNICOS

Eng.º Luiz Henrique Teixeira - CREA: 39735/D

Eng.ª Aline Sendeski - CRQ: 9302996/IX | CREA: 15558/D PR

ASSISTÊNCIA TÉCNICA

+55 41 3091 2243

aline.sendeski@cbbasfaltos.com.br

MATRIZ
CURITIBA PR
41 3091.2200 | R. João Bettega 3500 CIC 81350-000 Curitiba PR

FILIAIS
APUCARANA PR
43 3423.7177

S. J. DOS CAMPOS SP
12 3911.4178

ESTEIO RS
51 3458.3475

CONTAGEM MG
31 3396.2071

cbbasfaltos.com.br