

RELATÓRIO FINAL



**Estudo do comportamento mecânico e funcional da mistura
asfáltica modificada por borracha reciclada de pneus pelo Processo
Úmido, utilizada na execução da camada de rolamento da rodovia BR-
290/Rs.**


Recebido Setembro/05

Setembro, 2005

RESUMO

Este trabalho apresenta uma pesquisa experimental que buscou avaliar o desempenho da camada de rolamento executada com misturas asfálticas modificadas por borracha reciclada de pneus. Para tanto, foram realizados levantamentos de campo e ensaios laboratoriais tanto da mistura produzida, quanto da executada no trecho entre os km 1,5 ao 19 da pista com sentido Osório – Porto Alegre. Assim como realizados ensaios adicionais para verificar o comportamento da mistura. Através dos ensaios e levantamentos realizados foi possível verificar o bom desempenho das misturas modificadas por borracha, tanto do ponto de vista estrutural quanto de desempenho.



1. Introdução

1.1 Relevância da pesquisa

O aumento do tráfego rodoviário proporciona uma elevada quantia de pneus inservíveis, os quais são descartados, na sua maioria sem um prévio tratamento, resultando num acumulo de 35 milhões de carcaças de pneus por ano no Brasil (Fiori, 1998). Uma das formas de amenizar este grave problema ambiental é a utilização desta borracha como material de pavimentação, o que além dos benefícios ambiental, proporciona uma melhoria das propriedades de serventia e desempenho do pavimento.

1.2 Objetivo Geral

Verificar os benefícios proporcionados pela inclusão de borracha a mistura asfáltica, através da análise do desempenho da camada de rolamento executada com este material, construída na BR290.

1.3 Objetivo específico

Para verificar o desempenho da camada rolamento executada com mistura asfáltica modificada pela incorporação de borracha reciclada de pneus através do Processo Úmido, serão avaliadas a evolução das deflexões, irregularidade, textura, densificação e afundamento de trilha de roda, além de analisar o comportamento mecânico da mistura asfalto-borracha. Complementarmente será realizado um estudo sobre a influência da temperatura do processo de mistura em usina, assim como a de compactação, nas propriedades da mistura asfalto-borracha, já que neste tipo de mistura a inclusão de borracha aumenta a viscosidade do ligante, necessitando que os processos de mistura e compactação sejam realizados em temperaturas maiores que misturas asfálticas executadas com ligantes convencionais.

2. UTILIZAÇÃO DE BORRACHA RECICLADA DE PNEUS COM MODIFICADORA DE MISTURAS ASFÁLTICAS

A produção das misturas asfálticas modificadas por borracha é realizada com restos ou resíduos de borracha, podendo conter aditivos ou modificadores adicionais e de acordo com várias técnicas. Entre elas, a utilizada para pavimentação do trecho da BR290 que será analisado, o Processo Úmido, onde a borracha moída é incorporada ao ligante, num valor aproximado de 15% da massa do ligante ou em torno de 1,5% da massa da mistura. Os ligantes modificados com borracha são denominados asfalto-borracha.

Para a obtenção da borracha utilizada para modificar o ligante, é realizado o desmonte dos pneus que pode ser feito de diferentes maneiras, entre elas, o cisalhamento mecânico da borracha à temperatura ambiente, o congelamento do material e posterior cisalhamento e o processo de extrusão com o uso de aditivos.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para a análise do comportamento de misturas modificadas por borracha reciclada de pneus em campo foram realizados um programa de ensaios e levantamentos, com o objetivo de determinar o desempenho destas misturas numa situação de tráfego real.

Neste capítulo, serão comentados os materiais utilizados, os levantamentos de campo realizados e os ensaios laboratoriais realizados para a análise do comportamento mecânico e funcional das misturas Asfalto-Borracha.

3.1 Material utilizado

3.1.1 Ligantes modificados

Os ligantes modificados foram utilizados são provenientes da empresa Greca-asfalto e Petrobrás.

3.1.2 Agregados

Foram utilizados agregados, oriundos de rocha basáltica da formação Serra geral, assim como areia de jazida natural.

3.2 Procedimentos de ensaios e descrição de equipamentos

3.2.1 Levantamentos de campo

3.2.1.1 Macrotextura

O processo de determinação da macrotextura, pelo método da altura de areia (ASTM E965), é realizado já que o atrito entre o pneu e a superfície do pavimento constitui a resistência ao deslizamento, sendo esta, função da natureza dos materiais em contato, e da perda de energia causada pela deformação (histerese) do pneu. Esta resistência, que fornece as condições de atrito entre a camada de rolamento da estrada e o pneu dos veículos, deve ser suficiente para evitar que haja o deslizamento de veículos durante qualquer processo de manobra, como a frenagem.

Esta resistência é sensivelmente reduzida em alguns períodos do ano, quando a rodovia encontra-se úmida, devido a ação lubrificante do filme d'água sobre a superfície. Porém, a rugosidade da camada de rolamento, a qual forma a macrotextura do pavimento, forma



canais de drenagem que proporcionam um caminho preferencial para o escoamento d'água, drenando o pavimento. Esta macrotextura é a principal fonte de atrito, evitando a derrapagem, em caso de rodovias com a superfície úmida e veículos trafegando em alta velocidade.

A preocupação com a resistência a derrapagem se deve, a influência destas nos riscos de acidentes, sendo críticos em locais onde os veículos freiam, aceleram ou são sujeitos à aceleração radial, devido ao polimento da superfície ocorrido durante os períodos em que a camada de rolamento apresenta-se seca.

Portanto, para avaliar e monitorar a resistência a derrapagem da camada de rolamento da rodovia, será realizado o levantamento de textura, através da medida da rugosidade geométrica dos revestimentos rodoviários, obtida pela determinação da profundidade de areia obtida no ensaio de mancha de areia.

O ensaio de mancha de areia, que mede a rugosidade geométrica dos revestimentos rodoviários, através da determinação da profundidade de areia, consiste no espalhamento, de um volume conhecido de areia, na superfície do pavimento, formando uma área circular. O resultado deste ensaio é a obtenção da altura média das asperezas do revestimento, sendo chamado, por convenção, de profundidade média de areia de revestimento (Hs). Este parâmetro, que indica a sua rugosidade geométrica, é definido como sendo a relação entre a área circular formada e o volume de areia utilizado no ensaio.

Os equipamentos utilizados estão indicados abaixo:

- Cilindro com volume interno de $25 \text{ cm}^3 \pm 0,15 \text{ cm}^3$;
- Disco plano de 65 mm de diâmetro revestido com uma superfície de borracha de espessura variando de 1,5 a 2,5mm;
- Micro esfera de vidro com granulometria padronizada, tendo 90% da sua massa passante na peneira de nº 60 e retida na peneira de nº 80);
- Brocha doce para limpeza do local de ensaio;
- Régua de 500 mm, para medição do diâmetro da seção circular gerada;
- Recipiente para armazenar a micro esfera de vidro;

- Paravento em locais que haja necessidade;

O ensaio é realizado seguindo os seguintes passos:

- Secar e varrer a superfície do pavimento onde será executado o ensaio;
- Derramar a micro esfera de vidro, com volume de 25 cm³, sobre o revestimento para formar um só monte;
- Com auxílio do disco estender a micro esfera de vidro sobre a superfície por meio de movimentos circulares, de modo a formar uma área circular. Neste momento a micro esfera enche as depressões e os vazios do pavimento;
- Medir o diâmetro - D(cm), área formada, realizar a leitura de dois valores perpendiculares entre si.

Para a obtenção de Hs, utiliza-se a fórmula apresentada abaixo:

$$H_s = \frac{4 * V}{\pi * D^2}$$

Para a realização do levantamento de macrotextura na rodovia BR 290, foram realizados a medição em três pontos, numa seção transversal, na faixa lenta, nas distâncias de 1, 1,875 e 2,75 metros, sendo o valor de Hs o resultado da média dos valores encontrados nesta seção.

A classificação da textura do pavimento pode ser vista na tabela apresentada abaixo:

Profundidade média da areia - Hs(mm)	Textura Superficial
$H_s \leq 0,20$	muito fina
$0,20 < H_s \leq 0,40$	fina
$0,40 < H_s \leq 0,80$	média
$0,80 < H_s \leq 1,20$	grosseira
$H_s > 1,20$	muito grosseira

O valor de Hs não leva em conta diretamente a forma das asperezas, porém ela é características do revestimento, representando o volume de canais da superfície, o que traduz a possibilidade de esgotamento da água sob os pneus.

3.2.1.2 Levantamento de irregularidade e afundamento de trilha de roda

Para a determinação a serventia de pavimentos, a qual indica as condições de rolamento, sendo a irregularidade longitudinal, o parâmetro preponderante na determinação da serventia do pavimento. Esta irregularidade é definida como o desvio da superfície da rodovia, em relação a um plano de referência, que afeta a dinâmica dos veículos, a qualidade do rolamento e as cargas dinâmicas sobre a via.

Sua medida se faz, em ondulações com comprimento de onda compreendidas entre 0,5 e 50m, sendo que o primeiro equipamento usado para este fim era chamado de “Viagraph”, constituído de uma régua comprida que era arrastada sobre o pavimento, sendo que a medida dos afundamentos ou saliências, que provocam as irregularidades, era feita no seu ponto central. Atualmente, são utilizados diversos equipamentos para avaliar a irregularidade do pavimento, como os equipamentos tipo-resposta e os medidores de perfil. Os primeiros começaram a serem utilizados na década de 20, e determinam a irregularidade do pavimento através da medição dos movimentos da suspensão do veículo onde foram instalados. Porém apresentam as limitações de precisarem de trechos de calibração, e os resultados dependerem da velocidade do veículo, e de características de manutenção do veículo como, o peso, suspensão e pneus. Já os medidores de perfil, ao serem passados por determinada superfície gera uma saída digital ou analógica relacionada com o perfil real. Entre estes temos o de nível e mira, que são estáticos, e os perfilômetros inerciais, dinâmicos. Estes últimos, por sua vês usam sensores de aceleração, que tornam possível o cálculo instantâneo da altura de referência, e medidores de distância sem contato, que permitem, a partir dos dados coletados a determinação de índices relativos à condição superficial, como o IRI e o QI. As leituras dos perfis do pavimento são realizadas com o veículo em movimento, na velocidade da via, para posterior determinação dos índices de irregularidade.

O perfilômetro inercial utilizado neste levantamento possui 5 sensores laser e 2 acelerômetros, capaz de realizar medições à frequência de aproximadamente 2000 medições por segundo. Pelo fato de possuir 5 módulos lasers, o equipamento possibilita a determinação individualizada por trilha de roda, tanto da irregularidade longitudinal, quanto dos afundamentos de trilha de roda - ATRs.

O mesmo é constituído por um módulo de medição de distância microprocessados – lasers, sensores de medição de aceleração vertical, sensor de medição de deslocamento/velocidade, sistemas eletrônicos microprocessados de coleta e transmissão dos dados para um computador, um microcomputador portátil e uma viga rígida de suporte dos sensores.

No funcionamento, durante a locomoção do veículo, são registradas à altas frequências os dados referentes aos sensores de distância, aceleração e deslocamento, ao mesmo tempo se faz a compensação da aceleração nas medidas dos sensores e gera como saída o perfil longitudinal e o índice de irregularidade. Posteriormente os dados são processados para a obtenção dos dados finais da irregularidade e afundamento plástico nas trilhas de roda.

Portanto, os perfilômetros inerciais são equipamentos que substituem de forma vantajosa os tradicionais medidores do tipo resposta nas avaliações de irregularidade e também os métodos manuais usados na medição de ATR, tais como a treliça.

Vantagens e características de Perfilômetros Inerciais Laser da medição da irregularidade longitudinal:

- Capacidade de medição em velocidades variáveis, preferencialmente maiores do que 30 km/h;
- Dispensa de trechos de calibração que são indispensáveis aos medidores do tipo resposta;
- Medição independente da manutenção das características do veículo;
- Melhor repetibilidade e maior precisão nas medições;
- Os resultados gerados por este tipo de equipamento não tendem a subestimar ou sobreestimar a irregularidade, qualquer que seja sua grandeza.

Em comparação com outros equipamentos utilizados em medições anteriores com medidores do tipo resposta, salienta-se que dependendo do equipamento empregado e das bases utilizadas na calibração dele, podem ocorrer variações substanciais dos valores da irregularidade longitudinal. Algumas pesquisas realizadas indicaram que medidores do tipo resposta tendem a sobreestimar valores de irregularidade baixos em mais de 50%, ou seja, foi verificado em um medidor do tipo resposta que QIs medidos na faixa de 25 cont/km, na verdade tinham somente 13 cont./km. Para valores de QI maiores, a defasagem tende a

diminuir. É importante fixar que tais limitações são dos equipamentos do tipo resposta e não acontecem em perfilômetros inerciais.

Vantagens e características da medição do ATR

- Medição muito mais segura para os técnicos que não necessitam se expor aos riscos do tráfego, nem expor os usuários a riscos maiores do que os necessários;
- Possibilidade de medição de muito mais pontos, gerando valores médios de ATR a cada 10 metros, muito mais confiáveis do que medições isoladas;
- A medição dos Afundamentos Plásticos em Cada uma das trilhas de roda tornou-se possível através do uso de 5 módulos laser que foram posicionados da forma mais conveniente para que a medição pudesse medir o afundamento máximo encontrado na rodovia.

Levando-se em conta que os 5 módulos laser são posicionados ao longo de uma barra rígida de 3 metros de comprimento, sendo que os módulos 1 e 5 ficam nas extremidades da barra, os módulos 2 e 4 ficam posicionados sobre as trilhas de roda e por fim, o módulo 3 fica no meio da barra.

O cálculo feito pelo equipamento para a determinação dos ATR é:

$$ATResq = L2 - (L1+L3)/2$$

$$ATRdir = L4 - (L3+L5)/2$$

Pelo exposto, pode-se verificar que a medição da irregularidade, que é representativa da capacidade funcional de um pavimento rodoviário, por meio de perfilômetros inerciais apresentam resultados mais confiáveis e mais detalhados do que os medidores do tipo resposta, além de não necessitarem dos trabalhosos trechos de calibração.

O levantamento foi realizado no turno da noite, executado durante três dias, onde foi disponibilizado pela Concessionária Concepa, a equipe de apoio, constituído de duas viaturas, para a realização da sinalização, e apoio da Polícia Rodoviária Federal. Algumas fotos do levantamento são apresentadas abaixo:



Foto1 – Montagem do equipamento



Foto2 – Vista do equipamento instalado



Foto 3–Detalhe dos Sensor Lasers



Foto 4–Posicionamento dos batedores

3.2.1.3 Levantamento da densificação *in situ* da camada de rolamento

Apesar da utilização de modificadores em misturas asfálticas, entre eles a borracha reciclada de pneus, proporcionar melhoras tanto do ponto de vista estrutural, quanto do desempenho de pavimentos betuminosos, ocorre, quando incorporados ao ligante asfáltico um aumento da viscosidade do material, que conduz a necessidade de temperaturas maiores para os processos de mistura em usina e de compactação, a qual deve ser realizada num tempo reduzido, evitando assim que a mistura fique abaixo da temperatura mínima necessária de compactação.

Esta necessidade de um aumento da temperatura conduz em dificuldades de compactação dos revestimentos, devida a rápida perda de temperatura destas misturas durante o processo de compactação, principalmente quando executadas em camadas delgadas.

A compactação da camada de rolamento influi no volume de vazios da mistura asfáltica, isto é, na densidade do pavimento, condicionando a resistência mecânica da mistura. Logo, para verificar o desempenho do revestimento asfáltico, é fundamental a determinação de seu grau de compactação, o qual é a relação entre a densidade aparente e a densidade máxima teórica de projeto da mistura asfáltica. Esta densidade aparente pode ser obtida em laboratório no ensaio de densidade, por intermédio de métodos destrutivos, no qual são extraídos testemunhos do pavimento, através de sondas rotativas, danificando o revestimento, que limita o número possível de amostragens. Tal limitação é solucionada com a realização de ensaios não destrutivos, utilizando densímetros, como do tipo não nuclear, que possibilita a determinação do grau de compactação num trecho mais abrangente, e numa maior velocidade de ensaio.

O equipamento Medidor de densidade do asfalto - Não nuclear é utilizado para determinar a densidade de pavimentos betuminosos durante e após sua compactação, e com sua tecnologia não nuclear, facilita a operação, armazenamento e transporte. Este pode ser utilizado para determinar o perfil de densidades em áreas críticas como: trilha de rodas e juntas longitudinais. O equipamento pesa em torno de 7,5 kg, e pode medir a densidade em profundidade de 2,5 a 10 cm, além de fornecer a temperatura e a umidade do pavimento

Para se obter a densidade aparente da mistura a partir do densímetro não-nuclear, torna-se necessário antes da execução do ensaio realizar a sua pré-calibração, obtendo assim o fator de calibração. Para tanto foram executados 10 pontos de calibração, onde foram realizadas amostragens, com sonda rotativa e determinação da densidade dos testemunhos em laboratório e comparação com os valores obtidos pelo densímetro. O fator de calibração é a diferença entre os valores obtidos *in situ* e em laboratório.

3.2.1.4 Levantamento visual contínuo (lvc)

O levantamento visual contínuo tem como objetivo analisar a condição de superfície dos pavimentos de modo contínuo, sendo realizado por técnicos, trafegando no trecho a uma velocidade média de 30 a 40 km/h, em que são registradas as ocorrências dos defeitos na faixa de rolamento. O avaliador estabelece segmentos com 1 km de extensão, de modo a anotar as ocorrências preponderantes que ocorrem na superfície do pavimento.

A avaliação do estado de superfície e o conforto ao rolamento de cada faixa de tráfego do pavimento devem ser realizada periodicamente, assim como, de forma simplificada, deve ser avaliada as condições do acostamento e faixas de segurança. Para esta avaliação são determinados sub-trechos homogêneos, na direção longitudinal, que servem de unidades de análise, sendo determinadas devido a variações significativas da estrutura do pavimento existente, do tráfego atuante, da idade da última camada estrutural aplicada e da geometria da via, sem levar em conta, porém os estados de superfície, deflexões ou camadas de desgaste. Estes sub-trechos foram divididos em extensão de 1 km variando até 2 km de extensão.

Além do registro dos defeitos existentes, a avaliação será complementada pela atribuição de um conceito à condição geral do pavimento, utilizando a escala PSR (Present Serviceability Rating) da ASSHTO, que é função do conforto ao rolamento nas velocidades operacionais da via com o grau de deterioração da superfície observado. Esta nota é atribuída conforme a escala mostrada na tabela abaixo:

PSR	Conceito	Condição Geral
4 - 5	Excelente	Pavimento praticamente isento de defeitos e com irregularidade perceptível na velocidade máxima do trecho em nível perfeitamente aceitável.
3 - 4	Bom	Presença de poucos defeitos, cuja extensão e severidade não afeta a condição funcional ou a condição estrutural do pavimento. A irregularidade longitudinal percebida pelo usuário trafegando na velocidade máxima do trecho pode ser qualificada como tolerável.
2 - 3	Regular	Pavimento pode requerer restauração, por estarem os

		defeitos existentes com níveis de extensão ou severidade capazes de afetar a condição estrutural e ou funcional do pavimento. O conforto ao rolamento percebido pelo usuário pode estar em níveis inaceitáveis.
1 - 2	Mau	Pavimento requer intervenção imediata.
0 - 1	Péssimo	Tráfego é prejudicado, tendo que reduzir velocidade devido à deterioração do pavimento. Riscos de segurança para os usuários.

Os defeitos que serão registrados são selecionados por sua relevância em condicionar o desempenho (funcional ou estrutural) futuro do pavimento, categorizado em três níveis de severidade, definidos em termos do grau de comprometimento da condição estrutural e ou funcional introduzindo pelo defeito no pavimento devido a sua presença. Esses níveis de severidade são:

- 1 ==> aceitável ==> defeito em sua condição inicial de aparecimento;
- 2 ==> tolerável ==> velocidade progressivamente crescente de aumento da severidade e da extensão do defeito;
- 3 ==> intolerável ==> intervenção imediata se faz necessária a fim de evitar danos à estrutura do pavimento e ou ao usuário.

Além disto deve ser analisada a extensão do defeito, em A (alta), M (média) e B (baixa).

Os tipos de defeito que estão sendo analisados são descritos abaixo:

CATEGORIA 1: Trincamento

- Trincamento couro-de-crocodilo (CR)

Consiste de trincas associadas à repetição das cargas do tráfego, causada pela fadiga do revestimento asfáltico decorrentes da ação repetida das cargas de tráfego, condições ambientais (temperatura e umidade), compactação deficiente e reflexão de trincas subjacentes ao revestimento. Tal defeito se manifesta na forma de trincas isoladas nas trilhas de roda, preferencialmente na direção longitudinal. Com a sua progressão, as trincas

se apresentam como uma série de trincas paralelas, que se interligam aos poucos, formando pequenos polígonos.

- Trincamento em bloco (BL)

Consiste de trincas interconectadas formando uma série de grandes polígonos, com padrão mais retangular que no caso do trincamento couro-de-crocodilo, onde os polígonos têm ângulos mais fechados. O trincamento em bloco é causado principalmente por retração do revestimento asfáltico e por variações diárias de temperatura (que resultam em ciclos diários de tensões e de deformações). Por não serem associadas às cargas do tráfego, tendem a se distribuir uniformemente por toda a área e às vezes aparecem apenas em áreas pouco trafegadas. Este defeito indica, em geral, que o asfalto perdeu significativamente suas características elásticas, seja por oxidação ou por volatilização de maltenos.

- Trincas transversais (TT)

São trincas aproximadamente perpendiculares ao eixo da pista. Sua origem pode ser devida a reflexão de juntas ou trincas subjacentes (devido a movimentação térmica e ou cargas do tráfego) ou trincamento por retração da própria camada asfáltica. Pode haver ou não perda de aderência entre a camada asfáltica e a camada subjacente na região da trinca.

- Trincas longitudinais (TL)

São trincas aproximadamente paralelas ao eixo da pista, mas afastadas de seus bordos. Tendem a serem causadas por um dos seguintes motivos:

1. Assentamentos da fundação;
2. Grandes diferenças de rigidez do pavimento entre os dois lados trinca;
3. Reflexão de trincas ou de juntas subjacentes;
4. Junta de construção no revestimento asfáltico mal executada;
5. Retração do revestimento asfáltico devido a temperaturas muito baixas ou devido ao endurecimento do asfalto, sob ciclos térmicos diários.

- Trincas de escorregamento (TE)

São trincas em formato de meia-lua ou de lua crescente, com as duas extremidades opondo-se ao sentido do tráfego. São produzidas quando rodas sob frenagem ou em giro fazem o revestimento escorregar (caso de aderência deficiente com a camada subjacente) ou se deformar (caso de mistura asfáltica de baixa resistência). Os critérios para extensão e severidade são os mesmos do trincamento em bloco.

- Trincas de bordo (TB)

São trincas próximas aos bordos do pavimento, sendo em geral paralelas ao eixo e situadas a no máximo 60 cm do bordo. Podem ser causadas por deficiência de espessura do revestimento ou da base nos bordos da pista, ou por alguma outra deficiência localizada, como excesso de umidade nas camadas subjacentes ao revestimento quando os acostamentos não são revestidos.

CATEGORIA 2: Desintegração

- Painelas (P)

São buracos (usualmente com menos de 90 cm de diâmetro) produzidos pela abrasão do tráfego em áreas onde o revestimento se dividiu em pequenos pedaços. Esta divisão pode ter ocorrido por se tratar de área com trincamento couro-de-crocodilo de alta severidade, por deficiência da mistura asfáltica do revestimento, ou devido a pontos localizados de enfraquecimento estrutural nas camadas de base e ou subleito. Seu crescimento é acelerado pelo acúmulo de água livre em seu interior, de onde decorre uma concentração de seu surgimento durante as estações chuvosas.

- Desgaste (D)

Perda de agregados e/ou argamassa fina do revestimento asfáltico, devido a perda do envolvimento do ligante asfáltico, resultando no incremento gradual da textura superficial do revestimento, expondo cada vez mais os agregados. Ocorre devido à volatilização de componentes e à oxidação do asfalto, sob a ação das condições climáticas, e em decorrência da abrasão produzida pelas rodas dos veículos.

- Desagregação superficial (DS)

Perda progressiva de agregados do revestimento, a partir da superfície, sob a ação da passagem das rodas dos veículos. Ocorre em misturas asfálticas onde há deficiência de ligante ou onde o asfalto foi oxidado durante a usinagem. Manifesta-se, em geral, pouco tempo após a abertura ao tráfego.

- Erosão de bordo (ER)

Consiste do resultado último das trincas de bordo, quando nenhuma intervenção é aplicada.

- Bombeamento de finos (BF)

Pode ocorrer ao longo de trincas, em geral no padrão couro-de-crocodilo ou de reflexão, devido a ejeção de misturas de água, argila ou silte, e pode ser observado mais nitidamente durante ou imediatamente após chuvas intensas, podendo não ser observável nas estações secas. É percebido pela existência de manchas na superfície ou pela acumulação de material fino junto às trincas.

- Desplacamento de capa selante (DC)

Defeito comum em Lama Asfáltica após uma certa idade ou tráfego acumulado. As variações térmicas diárias têm um importante papel em acelerar este fenômeno, mas o tráfego é o agente que aciona o deslocamento.

- Remendos (R)

Um remendo consiste de um reparo aplicado a uma área localizada do pavimento, onde o material original foi removido e substituído por outro material. Deve ser considerado um defeito, independentemente de seu desempenho, na medida em que uma área remendada e ou a área do pavimento no seu entorno não se comportam, em geral, tão bem quanto uma seção de pavimento original.

CATEGORIA 3: Deformações

3.1 - Generalizadas:

- Afundamentos em trilha de roda (ATR)

Depressão longitudinal localizada nas trilhas de roda, cujo comprimento mínimo é de cerca de 6 m. Trata-se de uma deformação permanente do pavimento, devido à ação repetida e

canalizada das cargas do tráfego, que produz deformações de consolidação volumétrica e distorção cisalhante em todas as camadas do pavimento. Elevações ao longo dos lados do afundamento podem ocorrer. Em muitos casos, os afundamentos podem ser observados apenas após uma chuva, ocasião em que há acúmulo de água nas trilhas de roda.

- Corrugações (COR)

Trata-se de uma série de vales e cristas transversais a intervalos regulares que são causadas pelo tráfego devido a esforços horizontais em rampas ou em locais de frenagem ou aceleração. A mistura asfáltica do revestimento pode não ser resistente o bastante para essas condições mais severas de solicitação, ou a camada de base pode ser instável.

3.2 - Localizadas:

- Escorregamento de massa (EM)

Formação de ondulações na superfície devido a instabilidade da mistura asfáltica sob as condições climáticas e de tráfego vigentes. Não há um padrão definido, exceto pela tendência de a massa asfáltica ser expulsa pelo tráfego para áreas fora das trilhas de roda.

- Depressões (DP)

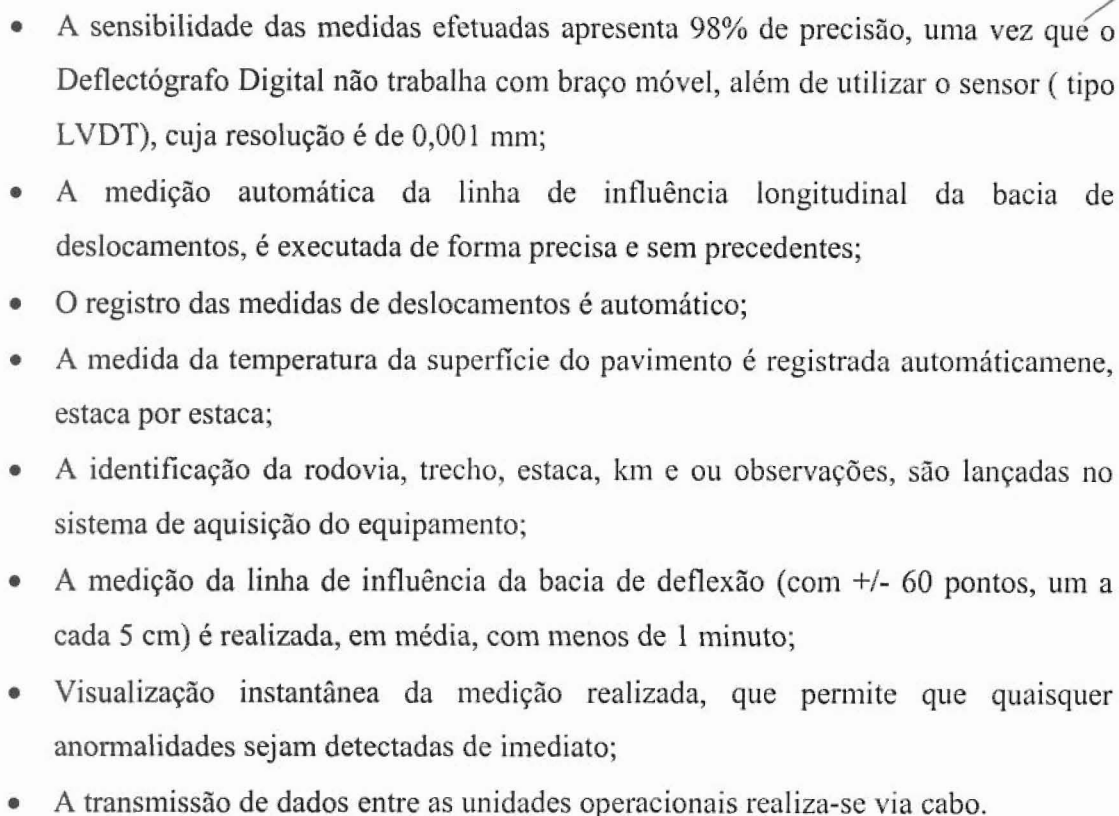
São áreas localizadas situadas abaixo da cota do pavimento em seu entorno. São criadas por recalque do solo de fundação, ou por deficiências na construção de alguma camada, podendo já existir desde a construção. Causam alguma irregularidade no pavimento e, quando suficientemente profundas e cheias d'água, podem provocar hidroplanagem.

- Expansão localizada (EL)

Levantamento localizado da superfície do pavimento, formando uma onda de comprimento em geral maior que 3 m, causado por solo expansivo ou por distorção da estrutura produzida pela ação do tráfego no caso de um pavimento com uma ou mais camadas apresentando resistência muito baixa. Pode ser ou não acompanhada por trincamento.

3.2.1.5 Levantamento deflectométrico

Os levantamentos deflectométricos foram realizados com o deflectografo digital que é um equipamento computadorizado que substitui a Viga Benkelman tradicional, com inúmeras vantagens, entre as quais podemos destacar:



O deflectógrafo digital é constituído por:

- Placa de processamento digital interno;
- Sensor para medição de deslocamento tipo Lvdtd;
- Sensor de temperatura;
- Medidor digital de deslocamento (odômetro), equipado com uma unidade de rádio transmissor de dados;
- Cabo de conexão ou Transmissor de rádio para a emissão dos dados para o computador (Real Time);
- Sistema de aquisição específico.

A operação do equipamento pode ser resumida da seguinte forma:

- Fixação do medidor de distância no parachoques do caminhão;
- Ligar o computador carregando o software de operação, ligar o deflectógrafo digital e o medidor de distância;

- Parar o caminhão cerca de 30/50 cm antes do ponto em que se deseja obter a deflexão máxima;
- Colocar o deflectógrafo digital por entre as rodas duplas traseiras, posicionando o sensor no ponto de medição;
- Ajustar o zero do sensor através da manopla na parte traseira do deflectógrafo digital;
- Apertar o botão ensaiar e sinalizar para que o caminhão se desloque vagarosamente em linha reta, por uma distância de cerca de 10 m;
- O software sinalizará o operador do fim da medição e mostrará imediatamente o desenho da linha de influência;

O sistema de aquisição, que acompanha o equipamento, é utilizado pelo operador que lançará as informações sobre a rodovia, trecho, estaca e observações. Além disso, serão lidas, em tempo real, as medidas de temperatura e deslocamento. Uma vez concluída a leituras na estaca, o operador poderá visualizar a linha de influência longitudinal da bacia de deflexão. O sistema operacional pode ser visto na Figura 3.1.4.5.a, assim como é apresentado uma linha de influência típica obtida no levantamento na Figura 3.1.4.5.b.

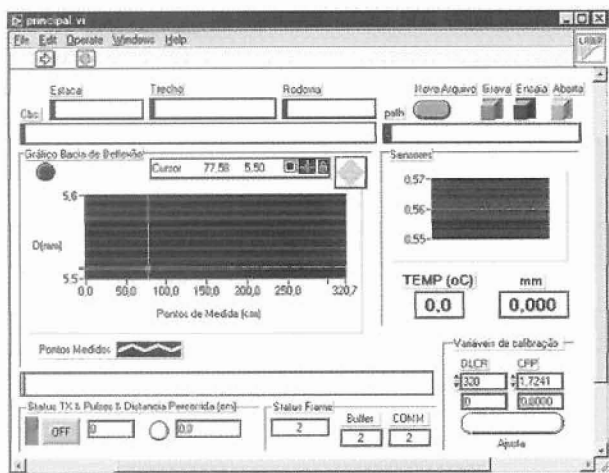


Figura 3.1.4.5.a Sistema operacional

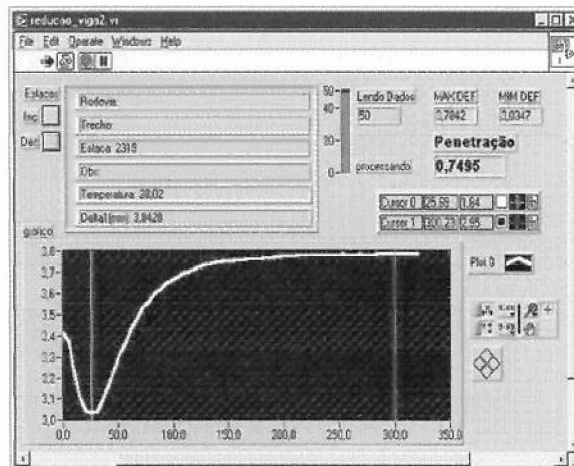


Figura 3.1.4.5.b Linha de influência

3.2.2 Ensaios Laboratoriais

Foram realizados ensaios em corpos-de-prova extraídos da camada de rolamento, assim como feito um estudo da influência da temperatura de mistura e compactação nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas modificadas com borracha. Os ensaios realizados foram os de densidade, resistência à tração e módulo de resiliência.

3.2.2.1 Ensaio de densidade

Relação entre o peso da mistura asfáltica ao ar e a diferença entre o peso ao ar e o peso da mistura em suspensão na água.

3.2.2.2 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Conhecido como “ensaio brasileiro” o ensaio de compressão diametral, tração indireta, foi desenvolvido para determinar a resistência a tração de corpos-de-prova, através de solicitação estática. Neste ensaio a amostra cilíndrica, é submetida a um carregamento de compressão, na velocidade de 0,8mm/s, em planos paralelos, diametralmente oposto, o que resulta num plano de tensões de tração, razoavelmente uniforme no plano perpendicular ao de aplicação da carga.

3.2.2.3 Ensaio de módulo de resiliência

Para a realização deste ensaio é utilizado um equipamento composto por uma estrutura metálica, um pistão que proporciona um carregamento repetido pulsante com auxílio de um dispositivo pneumático, acoplado a um regulador de tempo e frequência de 1Hz. O equipamento funciona dentro de uma câmara com temperatura controlada, o que permite a realização do ensaio em diferentes temperaturas. A partir da aplicação do carregamento, com tempo de 0,1 e 0,9s de repouso, a amostra sofre deformações horizontais, que são medidas através de um L.V.D.T., ligado a um microcomputador. O coeficiente de Poisson utilizado foi fixado em 0,3 para ensaios a 25°C.

4. Apresentação dos Resultados

4.1 Macrotextura

Abaixo, na Tabela 4.1, são apresentados os resultados dos ensaios de mancha de areia que foram realizados, assim como o tipo de revestimento, nos casos em que foram realizados lama asfáltica no trecho. Pode ser visto na Gráfico 4.1 a profundidade de areia pelo km.

MEDIDA DE PROFUNDIDADE DE AREIA - Hs			
Km	Hs	Km	Hs
1+500	1.5	10+000	1.4
2+000	1,5	10+500	1.2
2+500	1.4	11+000	1.5
3+000	1.6	11+500	1.4
3+500	1.4	12+000	1.6
4+000	1.2	12+500	0.6
4+500	1.3	13+000	0.5
5+000	1.6	13+500	0.7
5+500	1.2	14+000	0.4
6+000	1.4	14+500	0.6
6+500	1.5	15+000	0.5
7+000	1.3	15+500	0.7
7+500	1.4	16+000	0.6
8+000	1.3	16+500	0.5
8+500	1.6	17+000	0.6
9+000	1.2	17+500	0.6
9+500	1.5	18+000	0.5
		18+500	0.6

Tabela 4.1 Resultados do ensaio de mancha de areia

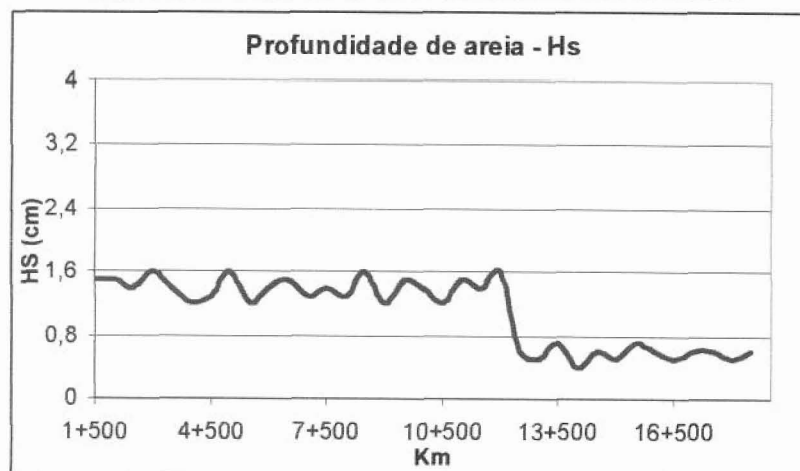


Gráfico 4.1 Profundidade de areia pelo km

Pode-se verificar que o pavimento executado com asfalto-borracha apresenta, em média, uma textura superficial considerada média, o que mostra o bom comportamento das misturas asfálticas produzidas com borracha reciclada de pneus, no que tange a segurança contra derrapagem, que pode provocar acidentes.



4.2 Levantamento de irregularidade e afundamento de trilha de roda

A partir do levantamento de irregularidade realizado, pode-se determinar o QI (coeficiente de irregularidade) a cada 200 metros, na faixa de rolamento executada com asfalto-borracha. Estes valores assim como os anteriores medidos nos mesmos locais, antes da aplicação da camada construída com asfalto-borracha, estão apresentados no Gráfico 4.2.a.

Os valores de trilha de roda no local em análise pode ser vistos no Gráfico 4.2.b.

IRREGULARIDADE - QI - Pista Norte

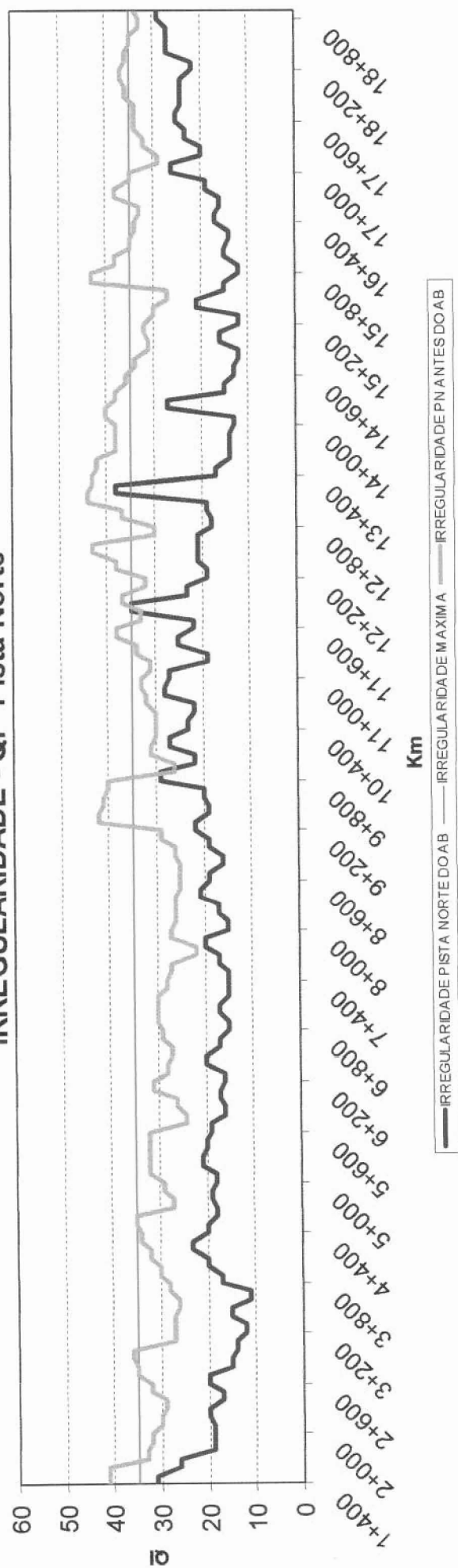


Gráfico 4.2.a – Resultados de QI no trecho analisado antes e após a execução da camada de rolamento utilizando asfalto-borracha.

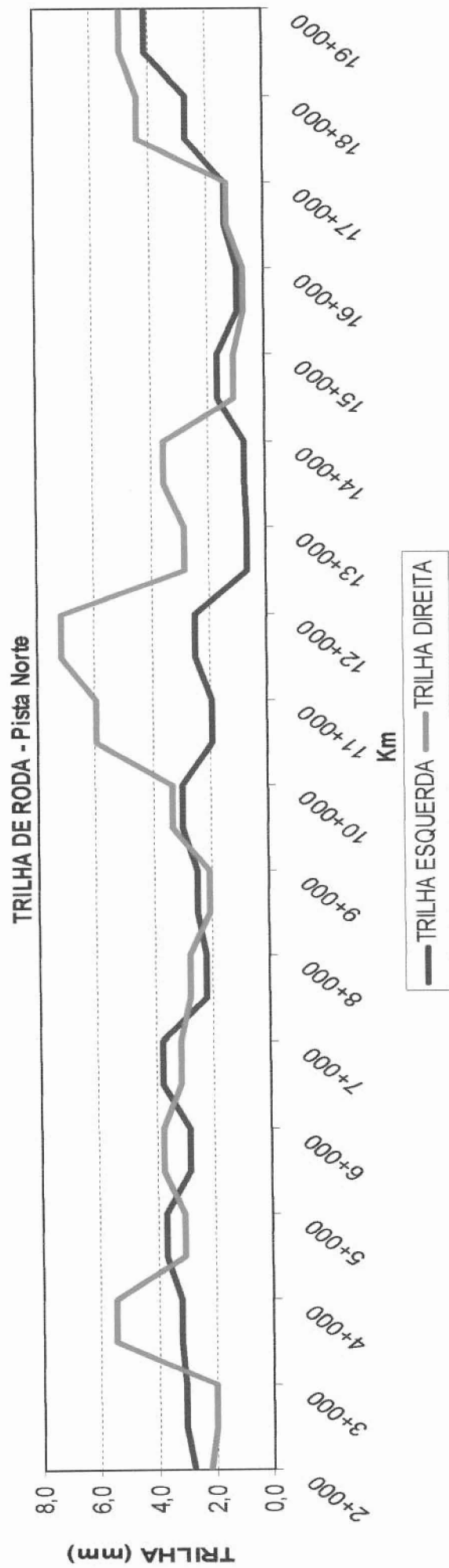


Gráfico 4.2.b – Resultados trilha de roda encontrados no local em estudo.

Para levantamentos de irregularidade longitudinais verificou-se a sensível diminuição das irregularidades no trecho após a execução da camada asfalto-borracha. Com isto, verifica-se que a mistura asfalto-borracha apresenta comportamento satisfatório na correção de irregularidades longitudinais, o que aumenta o conforto ao rolamento.

O afundamento de trilha de roda medida na trilha direita apresenta valores relativamente altos em um ponto específico, que pode ser devido a problemas executivos neste local em questão. Porém, na maioria dos locais os valores de trilha medidos são bastante baixo.

4.3 Levantamento da densificação *in situ*

Para verificar qual aumento da densidade da mistura, foram realizados ensaios de densificação utilizando o densímetro não-nuclear. Os resultados de densidade logo após a compactação e após aproximadamente 1 ano, sobre a ação do tráfego. Os resultados podem ser vistos na Tabela 4.3, que apresenta os pesos específicos após a compactação, e após a passagem do tráfego.

Km inicial	Km final	Peso específico (g/cm ³) Após compactação	Peso específico (g/cm ³) Atual	Variação
1+500	3+500	2.351	2.372	0,89%
3+500	5+580	2.383	2.391	0,33%
5+580	9+730	2.374	2.387	0,54%
9+730	12+780	2.375	2.392	0,71%
12+780	12+840	2.351	2.373	0,93%
12+840	14+400	2.370	2.400	1,25%
14+400	15+300	2.372	2.386	0,59%
15+300	17+060	2.357	2.417	2,48%
17+060	19+240	2.380	2.411	1,29%

Tabela 4.3 Resultados obtidos no levantamento de densificação *in situ*

Assim como nas misturas convencionais, houve, como esperado, uma pequena pré-compactação da camada asfáltica com o tráfego.

PROTÓCOLO
92
ANTY

4.4 Levantamento visual contínuo (lvc) da camada de rolamento

Os resultados do levantamento visual contínuo realizados na camada de rolamento executado no trecho em estudo, são apresentados na Tabela 4.4. Neste levantamento pode ser verifica as boas condições do trecho em estudo.

Subtrechos homogêneos			PSR	PATOLOGIA ENCONTRADAS																	PSR_ACOST		DEGRAU_CM	
STH	INICIO	FIM		Trincas						Desintegração							Deformações							
				CR	BL	TT	TL	TE	TB	P	D	DS	ER	BF	DC	R	ATR	COR	EM	DP				EL
1	1+500	3+000	4,5																			5,0	0,0	
2	3+000	4+000	4,5																			5,0	0,0	
3	4+000	5+000	4,5																			5,0	0,0	
4	5+000	6+000	4,5																			5,0	0,0	
5	6+000	7+000	4,5																			5,0	0,0	
6	7+000	8+000	4,5																			5,0	0,0	
7	8+000	9+000	4,5																			5,0	0,0	
8	9+000	10+000	4,5																			5,0	0,0	
9	10+000	11+000	4,5																			5,0	0,0	
10	11+000	12+000	4,5																			5,0	0,0	
11	12+000	13+000	4,0							A1				B		B1						5,0	0,0	
12	13+000	14+000	4,0							A1						B1						5,0	0,0	
13	14+000	15+000	4,5							B1				B								5,0	0,0	
14	15+000	16+000	4,5																			5,0	0,0	
15	16+000	17+000	4,5							B1												5,0	0,0	
16	17+000	18+000	4,5													B1						5,0	0,0	
17	18+000	19+000	4,5																			5,0	0,0	

Tabela 4.4 – Resultados do Levantamento Visual Contínuo

PROJETO GERAL
0000
NATY



Pode-se verificar com o levantamento que há panelas localizadas que surgiram por causa de problemas na execução da mistura asfáltica, o que poderá ser visto na seção 4.6.

4.5 Levantamento deflectométrico

Os levantamentos de deflexão realizados antes e após a execução da mistura asfalto-borracha estão apresentados no Gráfico 4.5.

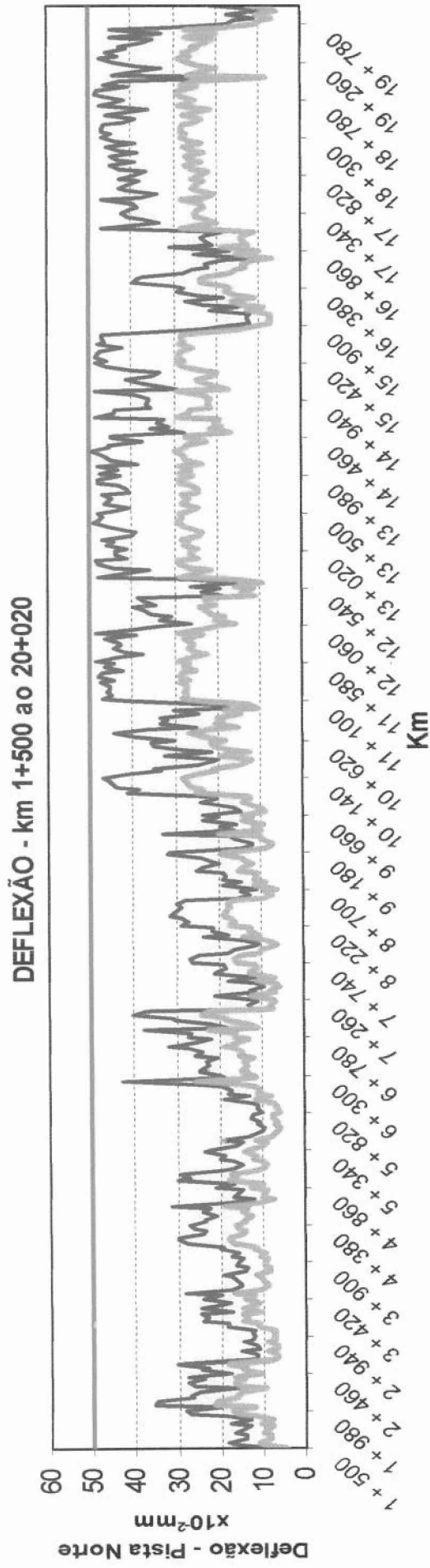


Gráfico 4.5 – Levantamento deflectométrico realizado no trecho em estudo

ANTT
101
PROTOCOLADO
10/10/2019

Pelos resultados pode-se verificar que não houve diminuição acentuada da deflexão, o que é aceitável, já que reconhecidamente as misturas asfalto-borracha apresentam menor módulo de resiliência, isto é, são mais deformáveis do que misturas convencionais.

75
100
150
200
250
300
350
400
450
500
550
600
650
700
750
800
850
900
950
1000

4.6 Ensaios realizados nos corpos-de-prova extraídos

A construção de pavimentos asfálticos, com a utilização de novos modificadores de misturas betuminosas requerem, muitas vezes, que sejam realizadas variações nos processos executivos. Porém, quando técnicas convencionais de construção são utilizadas, sem as devidas adaptações para estas novas tecnologias, podem resultar no surgimento de defeitos na camada de rolamento, que provocam o aceleração dos processos de deterioração dos revestimentos asfálticos. Entre estas misturas modificadas estão inclusas as produzidas com asfalto-borracha. Este modificador, provoca um aumento da viscosidade do ligante, quando comparado com as produzidas com ligante convencional, que conduz a necessidade de temperaturas maiores para os processos de mistura em usina e de compactação, a qual deve ser realizada num tempo reduzido, evitando assim que a mistura fique abaixo da temperatura mínima necessária de compactação. No trecho em estudo, numa extensão de 4 km, foi verificado o surgimento prematuro de panelas no pavimento.

Portanto, para determinar as causas desta deterioração, foi executado uma série de ensaio, em 75 corpos-de-prova extraídos a cada 250 metros deste trecho, para determinar a densidade e o grau de compactação desta camada. Além disto, foi executado ensaios mecânicos, para obter o módulo de resiliência e a resistência à tração da camada de revestimento, assim como realizado a reconstrução do traço da mistura.

Na figura 4.6.1 podem ser vistos os locais onde foram realizadas as sondagens, dos corpos-de-prova que serão submetidos aos ensaios comentados acima.

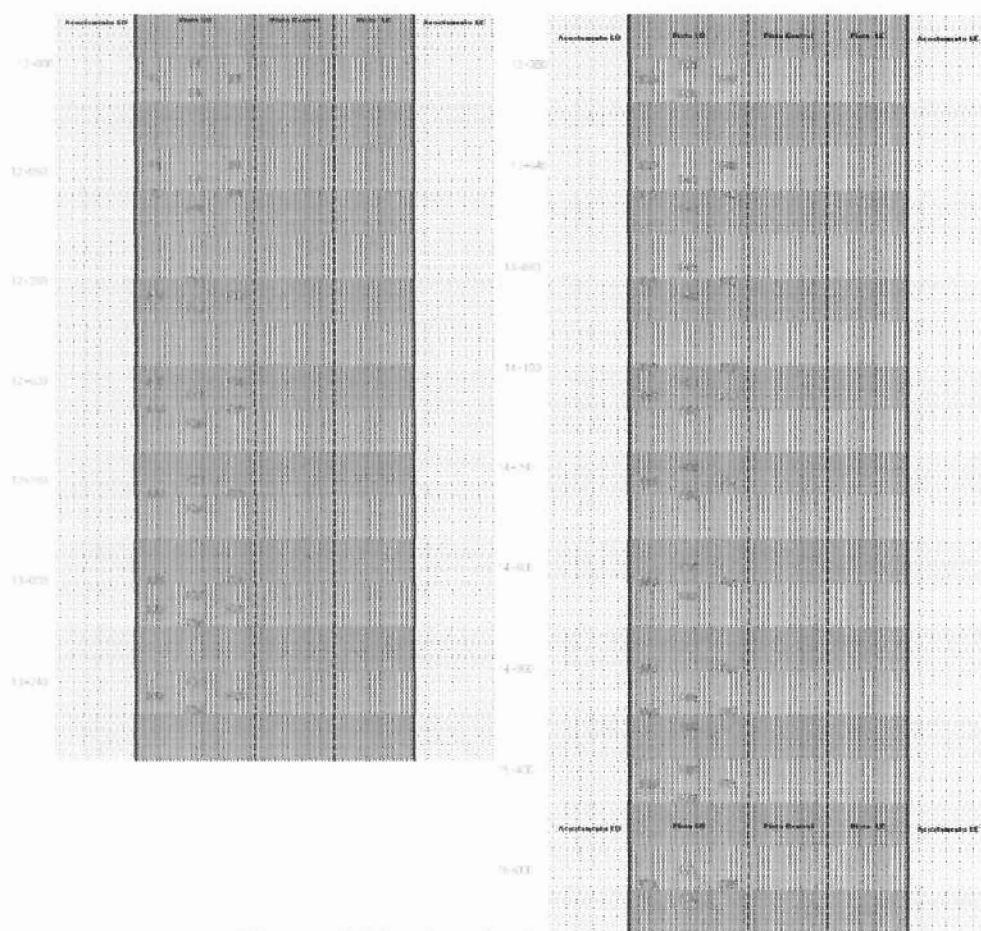


Figura 4.6.1 – Locais de extração dos testemunhos

4.6.1 Ensaio de extração de ligante

No projeto o teor de ligante era de 6,2%, para verificar se os teores utilizados estavam de acordo com o projeto, foi realizada extração de ligante, utilizando forno de ignição.

Porém, antes dos ensaios foi executado a calibração do forno, através da extração no forno de vários corpos-de-prova moldados, nos quais se conhecia o teor de ligante asfalto-borracha utilizado. Com os resultados foi traçado uma curva do teor real de ligante pelo teor indicado pelo forno. Esta curva pode ser vista na figura 4.6.1.a

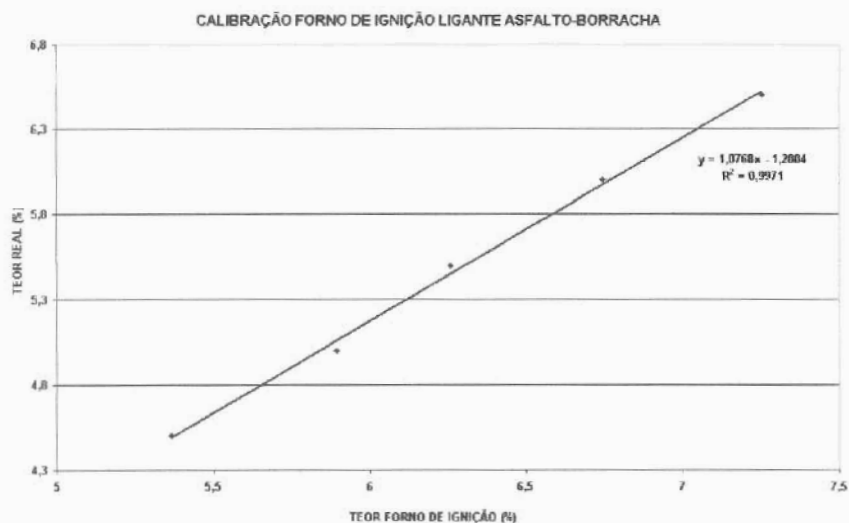


Figura 4.6.1.a Curva de calibração do forno de ignição utilizando asfalto-borracha

Com esta calibração foi possível determinar o teor de ligante dos corpos-de-prova extraídos, sendo os valores apresentados na Tabela 4.6.1.a

CP	Teor de Ligante(%)
10	6.25
20	6.7
24	6.9
29	6.4
40	5.65
47	6.75
51	7,6
55	7,5

Tabela 4.6.1.a Teor de ligante da mistura produzida

4.6.2 Ensaio de densidade

Pode-se notar que nos ensaios de densidade houve variação dos valores encontrados, quando comparados aos valores de projeto. Os valores de densidade encontrados podem ser verificados na Tabela 4.6.2.a.

CP	Peso específico aparente (g/cm³)	CP	Peso específico aparente (g/cm³)
1	2,388	40	1,997
2	2,389	41	1,983
4	2,377	43	2,181
5	2,380	44	2,091
6	2,339	45	2,221
7	2,367	46	2,160

PROTÓCOLO GERAL - ANTT
105

8	2,417	47	2,228
9	2,321	48	2,230
10	2,342	49	2,002
11	2,349	50	2,091
12	2,217	51	2,093
13	2,396	52	2,010
14	2,451	53	1,927
15	2,432	54	1,879
16	2,372	55	2,013
18	2,265	56	2,009
19	2,273	57	1,884
20	2,326	58	2,004
21	2,312	59	2,411
22	2,319	61	2,050
23	2,234	62	1,972
24	2,268	64	1,926
26	2,215	65	2,078
28	2,185	66	2,166
29	2,367	67	2,128
30	2,184	68	2,077
31	2,201	69	3,150
33	2,187	71	2,196
34	2,059	72	2,189
37	1,699	73	2,164
38	2,244	74	2,247
39	2,259	75	2,169

Tabela 4.6.2.a Resultados de densidade dos cps extraídos

Esta variação na densidade resulta em variação do volume de vazios da amostra, o que diminui a resistência da mistura. Na Tabela 4.6.2.b abaixo pode ser visto os valores de volume de vazios encontrados.

CP	Volume de Vazios	CP	Volume de Vazios
1	3,74%	40	19,51%
2	3,69%	41	20,06%
4	4,19%	43	12,08%
5	4,07%	44	15,70%
6	5,71%	45	10,50%
7	4,59%	46	12,93%
8	2,58%	47	10,19%
9	6,46%	48	10,13%
10	5,61%	49	18,28%
11	5,32%	50	14,67%




12	10,65%	51	14,55%
13	3,43%	52	17,97%
14	1,21%	53	21,36%
15	1,99%	54	23,32%
16	4,39%	55	17,82%
18	8,71%	56	18,02%
19	8,38%	57	23,12%
20	6,27%	58	18,22%
21	6,82%	59	2,81%
22	6,52%	61	17,36%
23	9,97%	62	20,50%
24	8,58%	64	22,37%
26	10,74%	65	16,25%
28	11,95%	66	12,70%
29	4,60%	67	14,21%
30	11,96%	68	16,26%
31	11,31%	71	11,50%
33	11,85%	72	11,79%
34	17,02%	73	12,76%
37	31,53%	74	9,43%
38	9,53%	75	12,58%
39	8,95%		

Tabela 4.6.2.b Valores de volume de vazios encontrados

4.6.3 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Os resultados de volume de vazios encontrados indicam, provavelmente, a diminuição da resistência do material, então para comprovar esta expectativa, foram realizados ensaios de resistência à tração. O valor de projeto era de 1,4MPa enquanto os valores encontrados nos testemunhos de sondagem podem ser vistos na Tabela 4.6.3.

CP	Resistência à tração (MPa)	CP	Resistência à tração (MPa)
1	0,726	38	0,882
4	1,041	39	1,352
5	1,256	44	0,733
8	1,470	46	0,923
9	1,018	48	1,332
12	0,769	49	0,834
13	0,900	52	1,020
14	0,914	53	0,569
15	0,980	56	0,857
19	1,210	58	0,796



21	1,034	59	0,949
22	1,024	61	1,051
23	0,967	64	1,178
26	0,833	67	0,951
30	1,169	72	0,898
31	1,194	74	1,352
34	1,071		

Tabela 4.6.3 Valores de resistência à tração encontrados

De um modo geral houve diminuição da resistência à tração, porém não foram muito significativas, somente em alguns pontos isolados foram constatados valores bastante baixos de resistência.

4.6.4 Ensaio de módulo de resiliência

Para verificar a rigidez da mistura foram executados ensaios de Módulo de Resiliência, sendo os valores obtidos apresentados na Tabela 4.6.4, assim com os valores da relação entre módulo de resiliência e resistência à tração, estão apresentados na mesma tabela.

CP	Módulo de Resiliência (MPa)	MR/Rt
4	2640	2540
5	5380	4280
9	3920	3850
19	4670	3860
30	4330	3700
31	7080	5930
39	7900	5840
48	6470	4860
52	3640	3570
53	5570	9790
56	3100	3620
61	5140	4890
64	5720	4860
72	3140	3480

Tabela 4.6.4 Resultados de Módulo de Resiliência encontrados

Pelos resultados de módulo de resiliência e pela relação entre o módulo de resiliência e a resistência a tração, pode-se verificar que em alguns pontos a mistura ficou muito rígida, apresentando relação MR/Rt acima de 5000, e também locais com uma relação muito baixa, menos que 3000 que indica uma mistura bastante deformável.

Com estes ensaios verificou-se que os processos de deterioração do revestimento em questão pode ter sido por causa de problemas na execução da mistura, já que ensaios realizados nas misturas de projeto apresentaram resultados apropriados. Além disto, há problemas intrínsecos a execução de misturas asfálticas modificadas por borracha, como problemas de controle de temperatura, que serão apresentados na seção 5 deste trabalho.

5. Análise da influência da temperatura nas propriedades das misturas asfálticas modificadas por borracha

A utilização de borracha reciclada de pneus na modificação de ligantes betuminosos resulta num aumento da viscosidade, sendo mais significativa quanto maior o teor de borracha adicionado. Este aumento da viscosidade com a incorporação da borracha pode ser vista no Gráfico 1, apresentado abaixo:

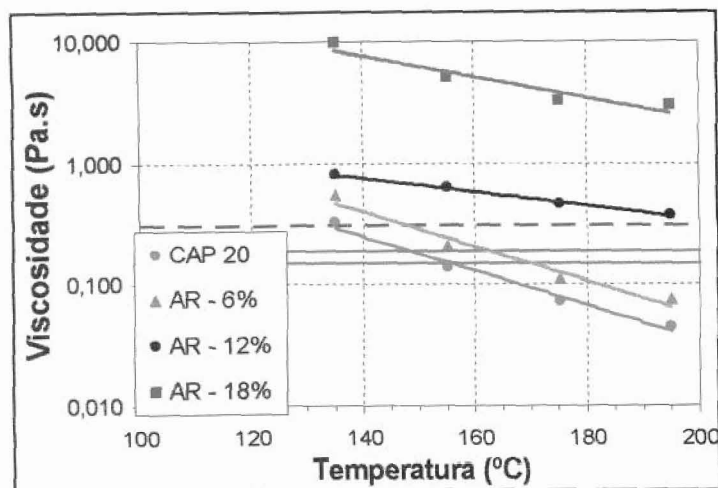


Gráfico 1 – Viscosidade do ligante *versus* temperatura

Como o ligante asfáltico deve estar a uma determinada viscosidade para se realizar os processos de mistura com o agregado pétreo em usina e de compactação, a utilização de ligantes asfalto-borracha, levam a necessidade de realizar estes processos a maiores temperaturas. Porém, a grande diferença de temperatura da mistura asfáltica produzida com a do meio ambiente acarreta numa elevada variação de temperatura da mistura, o que conduz a dificuldades de execução, já que com a perda de temperatura e conseqüente perda de viscosidade, não se consegue alcançar a compactação adequada.

Para verificar a perda de temperatura que ocorre durante o processo de transporte da massa asfáltica, foi realizado um levantamento desta perda em diversos caminhões, num dia com temperatura ambiente de aproximadamente 25°C. Esta variação pode ser vista no Gráfico 2.

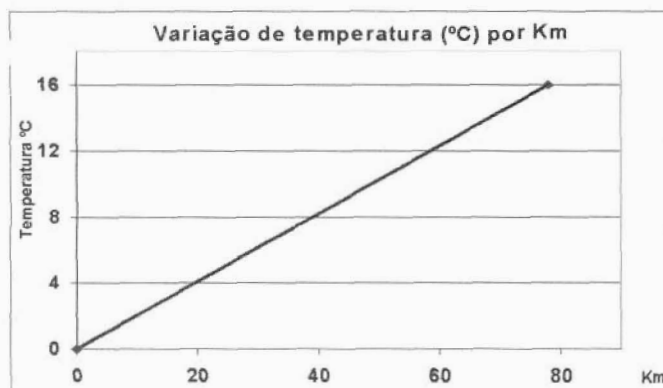


Gráfico 2 – Variação da temperatura da massa asfáltica durante o transporte

A partir deste gráfico pode-se verificar que a massa asfáltica está submetida há alta perda de temperatura, então, para verificar a influência da temperatura de mistura e de compactação nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas foram moldados 40 corpos-de-prova, onde se variou tanto a temperatura de mistura quanto de compactação, independentemente. Na Tabela 5.1 está apresentada as temperaturas utilizadas na moldagem dos corpos-de-prova.

Amostra	Temperatura Agregado (°C)	Temperatura Ligante (°C)	Temperatura Mistura (°C)	Temperatura Compactação (°C)
Lote 1 - 5cps	185	180	180	175
Lote 2 - 5cps	185	180	180	160
Lote 3 - 5cps	185	180	180	145
Lote 4 - 5cps	185	180	180	130
Lote 5 - 5cps	185	170	170	165
Lote 6 - 5cps	185	160	160	155
Lote 7 - 5cps	185	150	150	145
Lote 8 - 5cps	185	140	140	135

Tabela 5.1 – Temperaturas de mistura e de compactação

Estes corpos-de-prova foram submetidos aos ensaios de massa específica, para determinar a variação do volume de vazios, assim como ensaios mecânicos, para a

realização de uma análise da variação das propriedades tanto de resistência como de comportamento da mistura.

Os ensaios mecânicos realizados foram de resistência a tração por compressão diametral e módulo de resiliência. O primeiro ensaio, resistência à tração por compressão diametral, equipamento apresentado na Figura 5.1.a, ou tração indireta, é conhecido como “ensaio brasileiro”. Este foi desenvolvido para determinar a resistência a tração de corpos-de-prova, através de solicitação estática. Neste ensaio a amostra cilíndrica, é submetida a um carregamento de compressão, na velocidade de 0,8mm/s, em planos paralelos, diametralmente opostos, o que resulta num plano de tensões de tração, razoavelmente uniforme no plano perpendicular ao de aplicação da carga. O Ensaio de módulo de resiliência, equipamento apresentado na Figura 5.1.b, é realizado utilizando um equipamento composto por uma estrutura metálica, um pistão que proporciona um carregamento repetido pulsante com auxílio de um dispositivo pneumático, acoplado a um regulador de tempo e frequência de 1Hz. O equipamento funciona dentro de uma câmara com temperatura controlada, o que permite a realização do ensaio em diferentes temperaturas. A partir da aplicação do carregamento, com tempo de 0,1 e 0,9s de repouso, a amostra sofre deformações horizontais, que são medidas através de um L.V.D.T., ligado a um microcomputador. O coeficiente de Poisson utilizado foi fixado em 0,3 para ensaios a 25°C.

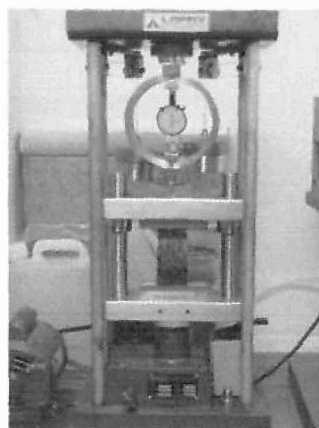


Figura 5.1.a – Equipamento de resistência à traça

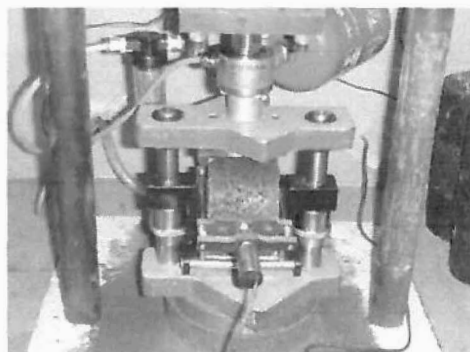


Figura 5.1.b – Equipamento de Módulo de Resiliência

A partir dos ensaios pôde-se quantificar a influência da temperatura nas propriedades da mistura. Os resultados de variação do volume de vazios pela temperatura, tanto das amostras onde se variou a temperatura de mistura quanto das que se variou a temperatura de compactação, podem ser vistas no Gráfico 5.1.c.

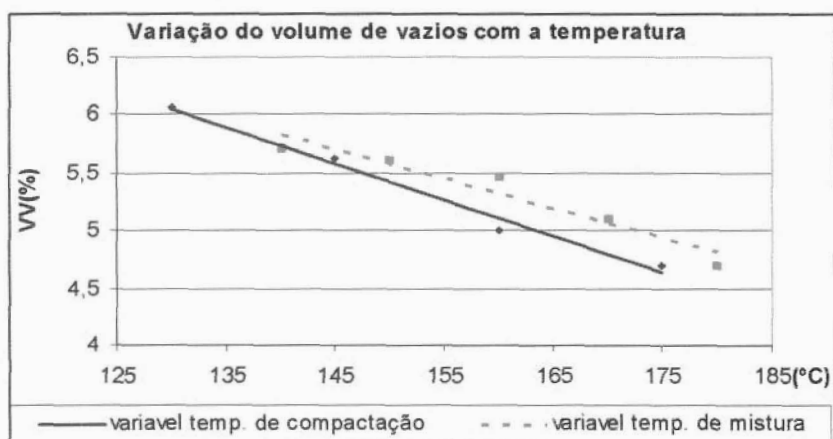


Gráfico 5.1.c – Variação do volume de vazios pela temperatura

A partir da análise deste gráfico pode-se verificar que a temperatura dos processos tem influência na variação do volume de vazios, sendo similar a influência da temperatura de mistura e compactação na variação desta propriedade.

Os resultados de variação da resistência à tração pela temperatura, estão apresentadas no Gráfico 5.1.d.

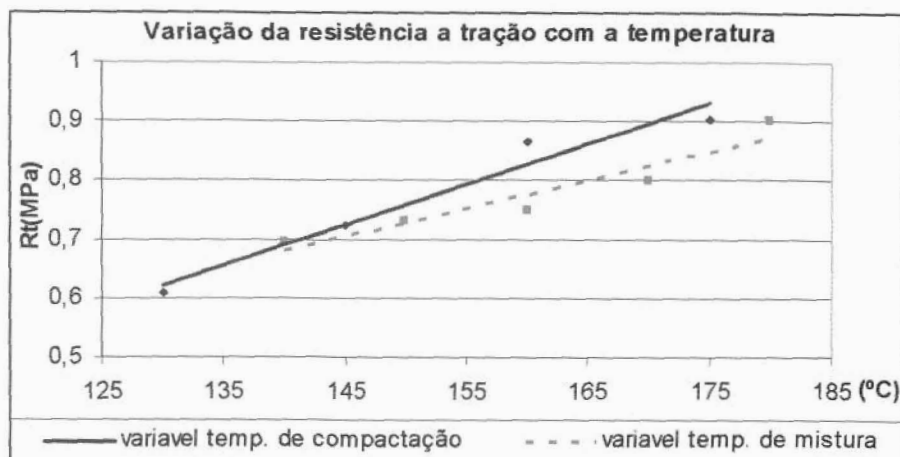


Gráfico 5.1.d – Variação da resistência à tração pela temperatura

Neste pode-se ver que a resistência à tração varia principalmente com a temperatura de compactação, sendo menos sensível a temperatura de mistura. A maior influência da temperatura de compactação na resistência à tração é perfeitamente aceitável pois esta resistência se deve ao intertravamento entre os agregados, que é alcançado com a compactação.

Os resultados da variação do módulo de resiliência pelas temperaturas de mistura e compactação podem ser vistos no Gráfico 5.1.e.

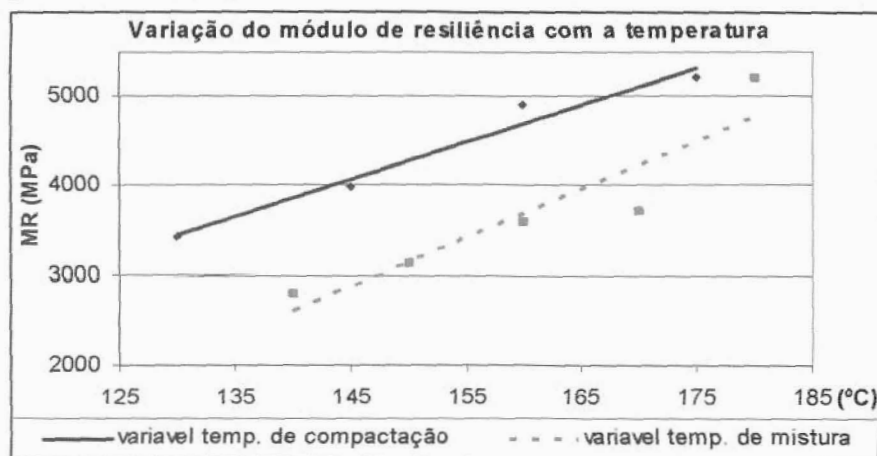


Gráfico 5.1.e – Variação do Módulo de resiliência pela temperatura

Este gráfico demonstra que tanto a temperatura de mistura quanto de compactação influenciam no módulo da mistura, tendo esta propriedade maior sensibilidade a temperatura de mistura. Isto se deve, principalmente ao fato que a deformabilidade deste material é primordialmente influenciada pelo ligante asfáltico. Ligantes modificados por

borracha apresentam maior elasticidade que ligantes convencionais, devido a propriedade da borracha, que é conferida ao ligante na incorporação.

Pelos resultados apresentados pode-se verificar, que o controle da temperatura durante o processo de execução de camadas asfálticas é fundamental para o bom desempenho do material, que apesar de possuir melhor desempenho do que misturas convencionais, necessitam que sejam realizadas pequenas modificações do processo executivo, como por exemplo, controlando a perda de temperatura durante os processos, para que sejam alcançadas as vantagens obtidas com a utilização das misturas asfálticas produzidas com asfalto borracha.

5. Procedimento de controle da mistura asfáltica modificada por borracha

Para a usinagem de misturas asfálticas modificadas por borracha reciclada de pneus, foram recomendados que fossem realizados, uma série de ensaios adicionais, com o intuito aumentar o controle da mistura que se estivesse usinando. Entre os ensaios adicionais que foram implantados, podemos citar, a determinação do teor de betume e granulometria do agregado, através da amostragem de 4 kg de massa, para a realização de extração de betume no forno de ignição, assim como os ensaios de Densidade, Módulo de Resiliência, Resistência à tração e Cantâbro, para amostragens realizadas por turno de trabalho.

Para uniformizar os procedimentos de ensaio, foi elaborado um procedimento para a realização de dosagem de CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente) pelo Método Marshall, assim como, um procedimento de controle da usina. Estes procedimentos foram escritos e repassados a equipe do laboratório da usina utilizada, assim como feito o acompanhamento para sua implementação. Estes procedimentos pode ser vistos no Procedimento 6.a que apresenta o procedimento para dosagem de CBUQ, e no Procedimento 6.b que apresenta o procedimento de controle da Usina.



Procedimento 6.a - Realização de dosagem de CBUQ pelo Método Marshall

Para a elaboração de projetos de concreto betuminoso usinado a quente pelo método Marshall, devem ser realizados os procedimentos apresentados a seguir:

➤ Granulometria do Agregado:

Realizar o ensaio separadamente para as frações da brita $\frac{3}{4}$ ", pedrisco (pó-de-pedra + $\frac{3}{8}$ "), areia e filer.

- Separar o material;
- Secar a amostra em estufa a 105°C;
- Esfriar a temperatura ambiente e pesar a amostra total;
- Lavar a amostra utilizando a peneira de malha 0,074mm;
- Secar o material em estufa até constância de peso;
- Pesar o material. A diferença entre este peso e o peso da amostra total, indica a fração de material passante na peneira de malha 0,074mm;
- Separar o conjunto de peneiras que serão utilizadas;
- Realizar o peneiramento manual em cada peneira do conjunto definido, até que não seja visível a passagem de material pela peneira, por pelo menos 1 minuto;
- Remover o material retido em cada peneira para um frasco adequado para pesagem, utilizando para isto, uma escova adequada para remover o material preso nas malhas;
- Pesar o material retido em cada peneira, de forma acumulada.

➤ Densidade e Absorção do Agregado Graúdo:

- Coletar no mínimo 3 kg de material;
- Lavar a amostra sobre a peneira 4,8 mm (#4);



- Secar até constância de peso – temperatura 105°C;
- Resfriar a temperatura ambiente;
- Pesar a amostra - Ms;
- Imergir o agregado em água, a temperatura ambiente, tendo o cuidado de agitar algumas vezes para expulsar as bolhas de ar do material;
- Remover a amostra da água e espalhá-la sobre um pano absorvente no tamanho adequado até que as películas visíveis de água sejam eliminadas. Realizar esta secagem em tempo reduzido para evitar evaporação de água dos poros;
- Pesar esta amostra – Mh;
- Colocar a amostra na cesta e imergi-lo completamente em água potável, a temperatura de 25°C;
- Pesar a amostra submersa, descontando a tara - L.

Cálculos:

Densidade real do agregado graúdo

$$D_{ap} = Ms/(Ms-L)$$

Densidade aparente do agregado graúdo

$$D_{ap} = Ms/(Mh-L)$$

Absorção

$$a = (Mh-Ms)*100/Ms$$

Amostragem:

Devem ser realizados pelo menos 2 amostragens para densidade aparente e densidade real desde que os resultados não difiram mais que 0,02. Já os ensaios de absorção devem ser



realizados em pelo menos duas amostragens, desde que os resultados não difiram mais que 0,2%.

➤ **Densidade Real do Agregado Miúdo:**

Relação da massa de determinado volume de amostra à 25°C (exclusive vazios) para a massa de igual volume de água destilada à mesma temperatura;

- Quartear uma amostra de 1Kg;
- Peneirar esta amostra entre as peneiras 4,8mm e 0,075mm e tomar cerca de 500g do material retido entre estas peneiras;
- Secar a amostra em estufa a 105°C até massa constante e resfriar a temperatura ambiente;
- Pesar o picnômetro vazio, seco e limpo – a;
- Colocar no picnômetro a amostra e pesar – b;
- Colocar água no picnômetro até cobrir completamente a amostra;
- Aquecer o picnômetro até fervura, agitando a amostra, por pelo menos 15 minutos;
- Esfriar o picnômetro em banho d'água a 25°C;
- Completar o volume vazio restante no picnômetro com água, a temperatura de 25°C, até o menisco;
- Enxugar o picnômetro com um pano limpo e seco;
- Pesar o picnômetro com o material – c;
- Retirar o material do picnômetro, lavar e encher o picnômetro até o traço de referencia com água a temperatura de 25°C. enxugar e pesar o picnômetro com água – d;

Cálculos:

Densidade real do agregado miúdo – D25

$$D25 = (b-a)/((d-a)-(c-b))$$

➤ **Determinação da temperatura de mistura e compactação:**

Para a mistura o cimento asfáltico deve ser aquecido a uma temperatura, na qual apresente uma viscosidade de (170 ± 20) cSt ou (85 ± 10) sSF;

Para a compactação o cimento asfáltico deve ser aquecido a uma temperatura, na qual apresente uma viscosidade de (280 ± 30) cSt ou (140 ± 15) sSF.

➤ **Preparação dos Corpos-de-prova:**

- Separar material suficiente e secá-los até massa constante em estufa a $(105 \text{ a } 110)^\circ\text{C}$;
- Fracionar material suficiente em cada fração;
- Pesquisar os agregados para um corpo-de-prova, de cada vez, em recipientes separados, nas quantidades indicadas de projeto, de modo que após mistura com o ligante produza corpo-de-prova com $(63,5 \pm 1,3)$ mm de altura;
- Colocar os recipientes em estufa e aquecer a temperatura de aproximadamente 10 a 15°C acima da temperatura de aquecimento do ligante. Para misturas convencionais a temperatura não deve ultrapassar 177°C ;
- Aquecer o ligante asfáltico em recipiente fechado. Não aquecer o ligante por mais de uma hora, evitando a aplicação muito intensa de calor;
- Retirar cada recipiente da estufa. Misturar os agregados, a seco, e adicionar o ligante, na temperatura estabelecida, realizando a sua homogeneização com a mistura de agregado;
- Efetuar a mistura do ligante com os agregados minerais rapidamente, de 2 a 3 minutos, até completa cobertura dos agregados. Colocar esta mistura no molde de compactação;
- Os moldes devem estar aquecidos na temperatura indicada para compactação;



- Colocar o molde em posição no suporte com uma folha de papel-filtro na parte inferior;
- Colocar a mistura no molde de uma única vez;
- Acomodar a mistura quente com 15 golpes vigorosos de espátula no interior e ao redor do molde e 10 no centro da massa;
- Aguardar a temperatura da massa chegar a indicada para compactação e aplicar 75 golpes por face do CP;

OBS.: Se a temperatura da mistura, imediatamente antes da compactação, estiver abaixo do limite inferior, a massa deve ser recusada, não sendo admitido de forma alguma o reaquecimento desta mistura.

- Após a compactação o CP deve ser deixado em repouso, numa superfície lisa e plana, durante, no mínimo 12 horas, à temperatura ambiente.

➤ **Densidade Aparente:**

Abaixo será descrito um resumo do procedimento que deve ser adotado para a realização de densidade aparente em corpos-de-prova (CP) com percentagem de vazios até 7%. Para CPs com teor de vazio maiores do que 7% deve ser consultado o DNER-ME 117/94;

- Pesar o CP ao ar, obtendo o valor P_{ar} ;
- Pesar o CP imerso em água (pesagem hidrostática) à temperatura ambiente, obtendo o valor P_i .

Cálculos:

A densidade aparente é dada pela fórmula abaixo:

$$d = P_{ar} / (P_{ar} - P_i)$$

➤ **Determinação da Estabilidade e Fluência:**

- Imergir os CPs em banho-maria a $(60 \pm 1)^{\circ}\text{C}$, por um período de 30 e 40 minutos. Como alternativa, podem ser colocadas as mesmas em estufa na mesma temperatura pelo período de 2 horas;
- Colocar o CP no molde de compressão, que deve estar nas temperaturas de $(21 \text{ a } 38)^{\circ}\text{C}$;
- O molde de compressão, contendo o CP é posicionado na prensa segundo a geratriz e o medidor de fluência é colocado e ajustado na posição do ensaio;
- Romper o CP, deslocando a prensa com uma velocidade de 5 cm por minuto.
- Anotar a leitura máxima do anel deflectométrico e anotar como estabilidade lida;
- Durante a aplicação da carga, a luva guia do medidor de fluência será firmada, com a mão, contra o topo do segmento superior do molde de compressão, diretamente sobre um dos pinos-guia. A pressão da mão sobre a luva do medidor de fluência deve ser relaxada, no momento em que se der o rompimento do corpo-de-prova, ocasião em que será lido e anotado o valor da fluência;

Procedimento 6.b - Controle da usina

Este relatório tem como objetivo indicar um número mínimo de ensaios que devem ser realizados para o controle da mistura asfáltica produzidas na usina da TRS, assim como descrever como estes devem ser realizados pela equipe de laboratório da TRS.

Antes do processo de usinagem deve ser feita a amostragem do material pétreo, assim como no ligante asfáltico, para realização de ensaios prévios a usinagem.

O material pétreo deve ser submetido, pelo menos quinzenalmente, aos ensaios de:

- ✓ Densidade Real do Agregado Graúdo;
- ✓ Densidade Aparente do Agregado Graúdo;
- ✓ Absorção;
- ✓ Análise Granulométrica;
- ✓ Adesividade do agregado graúdo ao ligante betuminoso;



- ✓ Equivalente Areia (EA);
- ✓ Lamelaridade.

O CAP deve ser submetido, a cada nova carga de ligante asfáltico adquirida pela TRS, a pelo menos o ensaio de:

- ✓ Penetração

Verificados os ensaios prévios no material, devem ser feitos ensaios na mistura asfáltica produzida. Estes ensaios devem ter periodicidade ao menos a cada turno de operação da usina.

- ✓ Marshall – Estabilidade e Fluência;
- ✓ Determinação do teor de ligante;
- ✓ Granulometria do material;
- ✓ Densidade Aparente;
- ✓ Resistência à tração.

Descrição dos ensaios a serem realizados:

➤ *Ligante Asfáltico*

- ✓ Penetração

Penetração é definido como a distância em décimos de milímetro que uma agulha padrão penetra verticalmente na amostra de material sob condições pré-fixadas de carga, tempo e temperatura.

Realizar o ensaio de Penetração segundo DNER-ME 003/99

Síntese do ensaio:

- Aquecer a amostra de ligante em estufa até que se torne fluída;
- Derramar a amostra no recipiente cilíndrico de penetração;

- Tampar o recipiente e deixar a amostra resfriar durante 120min. em local com temperatura entre 15 e 30°C;
- Colocar a amostra dentro do banho d'água com temperatura de $25^{\circ}\text{C} \pm 0,1^{\circ}\text{C}$, durante 120 min.;
- Retirar a amostra do banho d'água e colocá-la na cuba de transferência;
- Encher a cuba com água do banho d'água, de modo que a amostra fique totalmente submersa;
- Colocar a cuba de transferência sobre o prato do penetrômetro e executar o ensaio imediatamente. Verificar antes do ensaio a limpeza da agulha;
- Ajustar a agulha, já carregada, à superfície da amostra, fazendo com que coincidam exatamente a imagem da agulha refletida pela amostra com sua imagem verdadeira;
- Anotar a leitura do mostrador do penetrômetro ou trazer o seu ponteiro para a posição zero;
- Liberar rapidamente a agulha durante o tempo especificado. Ajustar o instrumento para medir a distância penetrada e anotar o valor. O recipiente que contem a amostra não pode sofrer nenhum movimento durante o ensaio, caso haja, o ensaio deve ser abandonado;
- Fazer a determinação de pelo menos três pontos da superfície da amostra, distantes entre si e da borda do recipiente de 1cm, no mínimo;
- Entre cada penetração, retirar tanto a cuba de transferência quanto o recipiente da amostra, do penetrômetro, e colocá-lo no banho a temperatura especificada. Limpar a agulha com solvente, enxugar com um pano limpo e seco e repetir a penetração em outro ponto da amostra.

Os resultados dos ensaios devem ter no máximo as variações indicadas na Tabela 3, 4 e 5 da norma DNER-ME 003/99.

➤ ***Agregado - material britado***

✓ **Densidade Real do Agregado Graúdo:**

Razão entre o peso, ao vácuo, da unidade de volume de um material, a uma determinada temperatura, e o peso, ao vácuo, da massa de igual volume de água destilada, livre de gases, à mesma temperatura.

✓ **Densidade Aparente do Agregado Graúdo:**

Razão entre o peso, ao ar, da unidade de volume de um agregado (porção impermeável), a uma dada temperatura, e o peso, ao ar da massa de igual volume de água destilada, livre de gases, à mesma temperatura.

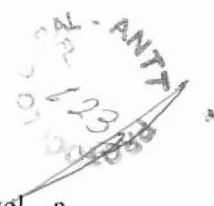
✓ **Absorção:**

Aumento da massa de agregado, devido ao preenchimento por água de seus vazios permeáveis, expresso com porcentagem de sua massa seca.

Realizar o ensaio de Absorção e Densidade do agregado graúdo segundo DNER-ME 081/98

Síntese do ensaio:

- Coletar no mínimo 3 kg de material;
- Lavar a amostra sobre a peneira 4,8 mm (#4);
- Secar até constância de peso – temperatura 105°C;
- Resfriar a temperatura ambiente;
- Pesar a amostra - Ms;
- Imergir o agregado em água, a temperatura ambiente, tendo o cuidado de agitar algumas vezes para expulsar as bolhas de ar do material;
- Remover a amostra da água e espalhá-la sobre um pano absorvente no tamanho adequado até que as películas visíveis de água sejam eliminadas. Realizar esta secagem em tempo reduzido para evitar evaporação de água dos poros;
- Pesar esta amostra – Mh;

- 
- Colocar a amostra na cesta e imergi-lo completamente em água potável, a temperatura de 25°C;
 - Pesar a amostra submersa, descontando a tara - L.

Cálculos:

Densidade real do agregado graúdo

$$D_{ap} = M_s / (M_s - L)$$

Densidade aparente do agregado graúdo

$$D_{ap} = M_s / (M_h - L)$$

Absorção

$$a = (M_h - M_s) * 100 / M_s$$

Amostragem:

Devem ser realizados pelo menos 2 amostragens para densidade aparente e densidade real desde que os resultados não difiram mais que 0,02. Já os ensaios de absorção devem ser realizados em pelo menos duas amostragens, desde que os resultados não difiram mais que 0,2%.

✓ Densidade Real do Agregado Miúdo:

Relação da massa de determinado volume de amostra à 25°C (exclusive vazios) para a massa de igual volume de água destilada à mesma temperatura;

Realizar o ensaio de Densidade Real de Agregado Miúdo segundo DNER-ME 084/95

Síntese do ensaio:

- Quartear uma amostra de 1Kg;



- Peneirar esta amostra entre as peneiras 4,8mm e 0,075mm e tomar cerca de 500g do material retido entre estas peneiras;
- Secar a amostra em estufa a 105°C até massa constante e resfriar a temperatura ambiente;
- Pesar o picnômetro vazio, seco e limpo – a;
- Colocar no picnômetro a amostra e pesar – b;
- Colocar água no picnômetro até cobrir completamente a amostra;
- Aquecer o picnômetro até fervura, agitando a amostra, por pelo menos 15 minutos;
- Esfriar o picnômetro em banho d'água a 25°C;
- Completar o volume vazio restante no picnômetro com água, a temperatura de 25°C, até o menisco;
- Enxugar o picnômetro com um pano limpo e seco;
- Pesar o picnômetro com o material – c;
- Retirar o material do picnômetro, lavar e encher o picnômetro até o traço de referencia com água a temperatura de 25°C. enxugar e pesar o picnômetro com água – d;

Cálculos:

Densidade real do agregado miúdo – D25

$$D25 = (b-a)/((d-a)-(c-b))$$

✓ **Análise Granulométrica**

Realizada para determinação da composição granulométrica de agregados graúdos e miúdos, por peneiramento.

Realizar o ensaio de Granulometria segundo DNER-ME 083/98

Síntese do ensaio:

- Separar no mínimo 1Kg de material;
- Secar a amostra em estufa a 105°C;
- Esfriar a temperatura ambiente e pesar a amostra total;
- Lavar a amostra utilizando a peneira de malha 0,074mm;
- Secar o material em estufa até constância de peso;
- Pesar o material. A diferença entre este peso e o peso da amostra total, indica a fração de material passante na peneira de malha 0,074mm;
- Separar o conjunto de peneiras que serão utilizadas;
- Realizar o peneiramento manual em cada peneira do conjunto definido, até que não seja visível a passagem de material pela peneira, por pelo menos 1 minuto;
- Remover o material retido em cada peneira para um frasco adequado para pesagem, utilizando para isto, uma escova adequada para remover o material preso nas malhas;
- Pesar o material retido em cada peneira, de forma acumulada;

Obs.: Não forçar a passagem de partículas através das malhas das peneiras.

Cálculos:

Para verificação da qualidade do ensaio, deve-se somar as massas retidas em cada peneira e comparar este total com a massa inicial da amostra seca, se houver diferença superior a 0,5%, repetir o ensaio.

- **Porcentagem da amostra total seca em cada peneira:**

Dividir a massa retida em cada peneira pela massa da amostra total seca.

- **Porcentagem acumulada de material seco em cada peneira:**

Soma-se a porcentagem retida na peneira com as porcentagens retidas nas peneiras de abertura maiores.

- **Porcentagem de material seco passando em cada peneira:**

Subtrai-se de 100% a porcentagem acumulada em cada peneira.

✓ **Adesividade do agregado graúdo ao ligante betuminoso**

A adesividade do agregado ao material betuminoso é a propriedade que tem o agregado de ser aderido por material betuminoso. A mesma pode ser verificada pelo não deslocamento da película que recobre o agregado, quando a mistura agregado-ligante é submetida, a 40°C, à ação de água destilada, durante 72 horas.

Realizar o ensaio de Adesividade segundo DNER-ME 078/94

Síntese do ensaio:

- Deve-se separar 500g de material passando na peneira de 19mm (#3/4) e retido na de 12,7mm(#1/2).
- Lavar e colocar dentro da água durante 1 minuto;
- Levar a amostra para a estufa, a 120°C, e nela permanecer durante 2 horas;
- Aquecer o ligante asfáltico em estufa a 120°C e o agregado a 100°C;
- Colocar sobre o agregado, uma quantidade de 17,5g de ligante e com uma espátula, misturar até a completa homogeneização, o ligante com o agregado.
- Colocar o agregado envolvido pelo ligante sobre uma superfície lisa, para o esfriamento do ligante;
- Colocar a mistura em um frasco de vidro, recobri-lo com água, e levar em estufa a 40°C, mantendo-o em repouso durante 72 horas;
- Retirar da estufa e verificar, visualmente, o recobrimento das partículas pela película de ligante.

Resultados:

O resultado é considerado satisfatório quando não houver nenhum deslocamento da película betuminosa, ao fim das 72 horas, e não satisfatório quando houver total ou parcial deslocamento da película betuminosa.

✓ **Equivalente Areia (EA)**

Relação volumétrica que corresponde à razão entre a altura do nível superior da areia e a altura do nível superior da suspensão argilosa de uma determinada quantidade de solo ou de agregado miúdo, numa proveta.

Este ensaio a ser realizado na areia retirada na saída do alimentador frio, e no pó-de-pedra retirado da correia do britador.

Realizar o ensaio de Equivalente Areia segundo o DNER-ME 054/97

Síntese do ensaio:

- Umedecer uma amostra de material;
- Peneirar na peneira de 4,8mm (Nº4);
- Sifonar a solução de trabalho para a proveta, até atingir o traço de referencia a 10 cm da base;
- Transferir para a proveta, com auxilio de um funil, a amostra a ser ensaiada, cerca de 110 g de material solto;
- Bater no fundo da proveta firmemente com a mão várias vezes, a fim de deslocar as bolhas de ar;
- Deixar a proveta em repouso por 10 minutos;
- Tapar a proveta com uma rolha de borracha e agitá-la vigorosamente (utilizar agitador mecânico), executando-se 90 ciclos em aproximadamente 30 segundos, com deslocamento de cerca de 20cm.
- Lavar as paredes rapidamente e inserir tubo até o fundo da proveta, agitando a camada de areia para levantar o material argiloso. Ao mesmo tempo girar a proveta.
- Completar com água até o menisco superior;
- Deixar em repouso por 20 minutos sem perturbação;
- Determinar o nível superior da suspensão argilosa – leitura no topo da argila;



- Introduzir o pistão cuidadosamente na proveta até assentar completamente na areia;
- Determinar o nível do centro de um dos parafusos de ajustagem e adotá-lo como leitura correspondente ao nível superior da areia – leitura no topo da areia.

Cálculos:

EA=leitura no topo da areia * 100 / leitura no topo da argila

✓ **Lamellaridade**

Realizar o ensaio de Lamellaridade segundo DAER/RS EL 108/01

Síntese do ensaio:

- Anotar na folha de ensaio a “%que passa” resultante do ensaio de granulometria;
- Pesquisar cada fração a ser ensaiada e anotar na folha de ensaio como “peso das frações”;
- Passar as partículas de cada fração na abertura correspondente da placa de lamellaridade e classificá-las em dois grupos: as retidas e as que passam;
- Determinar o peso das partículas que passam de cada fração pela placa de lamellaridade e anotar como “peso do material que passa de cada fração”.

Cálculos:

- Obter a “% das frações” calculando a diferença entre a “% que passa” da fração anterior e da presente fração;
- Obter o “índice de lamellaridade de cada fração” dividindo o “peso do material que passa de cada fração” pelo “peso da fração”. Expressar o valor em percentagem;
- Obter o “índice de lamellaridade do agregado” dividindo o somatório dos “índices de lamellaridade ponderados das frações” pelo somatório das “%das frações”.

➤ ***Mistura Asfáltica***

✓ Estabilidade e Fluência

Os corpos-de-prova utilizados nos ensaios de estabilidade e fluência devem ser moldados segundo o método Marshall, conforme descrito no DNER-ME 043/95.

Realizar o ensaio de Estabilidade e Fluência segundo DNER-ME 043/95

Síntese do ensaio:

- Imergir os CPs em banho-maria a $(60 \pm 1)^\circ\text{C}$, por um período de 30 e 40 minutos. Como alternativa, podem ser colocadas as mesmas em estufa na mesma temperatura pelo período de 2 horas;
- Colocar o CP no molde de compressão, que deve estar nas temperaturas de $(21 \text{ a } 38)^\circ\text{C}$;
- O molde de compressão, contendo o CP é posicionado na prensa segundo a geratriz e o medidor de fluência é colocado e ajustado na posição do ensaio;
- Romper o CP, deslocando a prensa com uma velocidade de 5 cm por minuto.
- Anotar a leitura máxima do anel deflectométrico e anotar como estabilidade lida;
- Durante a aplicação da carga, a luva guia do medidor de fluência será firmada, com a mão, contra o topo do segmento superior do molde de compressão, diretamente sobre um dos pinos-guia. A pressão da mão sobre a luva do medidor de fluência deve ser relaxada, no momento em que se der o rompimento do corpo-de-prova, ocasião em que será lido e anotado o valor da fluência;

✓ Determinação do teor de ligante

Realizar o ensaio de percentagem de betume por meio do extrator centrífugo segundo DNER-ME 053/94

Síntese do ensaio:

- Colocar o material betuminoso em estufa a $100\text{-}120^\circ\text{C}$, por uma hora;
- Quartear a mistura até obter uma amostra com cerca de 1Kg;

- Pesar a amostra no interior do prato do extrator de betume. Descontado a tara (peso do prato) tem-se o peso da amostra total;
- Colocar o papel filtro no prato centrifugador e atarraxar firmemente a tampa;
- Colocar o prato no interior do aparelho;
- Despejar no interior do prato 150 ml de solvente;
- Esperar cerca de 15 minutos e acionar o aparelho;
- Acionar, no início, o prato suavemente, aumentando a velocidade gradativamente, até que a solução de betume e solvente venham a escoar;
- Quando esgotar a carga de solvente, parar o aparelho e adicionar uma nova porção de solvente no prato;
- Repetir esta ação, com adições de 150 ml, até o solvente escoar claro;
- Esgotada a última carga de solvente, deixar o prato com o agregado e o papel filtro, sem a tampa, a temperatura ambiente até que a maior parte do solvente tenha se evaporado. Após colocar o conjunto em estufa a 80°C a 100°C, até constância de peso;
- Pesar o agregado recuperado, depois de seco. O peso da amostra antes do ensaio menos o do agregado recuperado, dá o peso do betume extraído.

Cálculos:

A percentagem de betume é calculada pela fórmula:

$$P = \text{peso do betume extraído} * 100 / \text{peso da amostra total}$$

✓ Densidade Aparente:

A densidade aparente de uma mistura betuminosa é a relação entre o peso da mistura ao ar e a diferença entre o peso ao ar e o peso da mistura em suspensão na água.

Realizar o ensaio de determinação de densidade aparente segundo DNER-ME 117/94

Síntese do ensaio:

Abaixo será descrito um resumo do procedimento que deve ser adotado para a realização de densidade aparente em corpos-de-prova (CP) com percentagem de vazios até 7%. Para CPs com teor de vazio maiores do que 7% deve ser consultado o DNER-ME 117/94;

- Pesar o CP ao ar, obtendo o valor P_{ar} ;
- Pesar o CP imerso em água (pesagem hidrostática) à temperatura ambiente, obtendo o valor P_i .

Cálculos:

A densidade aparente é dada pela fórmula abaixo:

$$d = P_{ar} / (P_{ar} - P_i)$$

✓ **Resistência à tração**

Abaixo será descrito o método para determinação da resistência à tração, de corpos-de-prova cilíndricos de misturas betuminosas, através do ensaio de compressão diametral.

O CP deve ter forma cilíndrica com diâmetros de $10 \pm 0,2$ cm e altura entre 3,5 a 6,5cm.

Realizar o ensaio de resistência à tração segundo DNER-ME 138/94

Síntese do ensaio:

- Medir a altura (H) do CP com paquímetro, em quatro posições diametralmente opostas. Adotar como altura o valor da média aritmética das quatro leituras;
- Medir o diâmetro (D) do CP com o paquímetro, em três posições paralelas. Adotar como altura o valor da média aritmética das três leituras;
- Colocar o CP em estufa, por um período de 2 horas, a temperatura de 25°C;
- Posicionar o CP no friso da prensa, aplicando uma leve compressão, capaz de manter em posição o CP;
- Aplicar a carga progressivamente, como uma velocidade de deformação de $0,8 \pm 0,1$ mm/s, até que se de a ruptura, por separação das duas metades do CP, segundo o plano diametral vertical;



- Anotar o valor da carga de ruptura (F).

Cálculos:

$$\sigma_R = 2 \cdot F / (100 \cdot \pi \cdot D \cdot H)$$

onde:

σ_R – resistência à tração, MPa;

F – carga de ruptura, N;

D – diâmetro do CP, cm;

H – altura do CP, cm.

Ou

$$\sigma_R = 2 \cdot F / (\pi \cdot D \cdot H)$$

onde:

σ_R – resistência à tração, kgf/cm²;

F – carga de ruptura, kgf;

D – diâmetro do CP, cm;

H – altura do CP, cm.

6. CONCLUSÃO

Esta pesquisa analisou a camada de rolamento construída com misturas modificada por borracha reciclada de pneus, pelo processo úmido, de um trecho da rodovia BR 290/RS, com o intuito de avaliar o comportamento deste tipo de mistura em rodovias, submetidas a tráfego intenso.

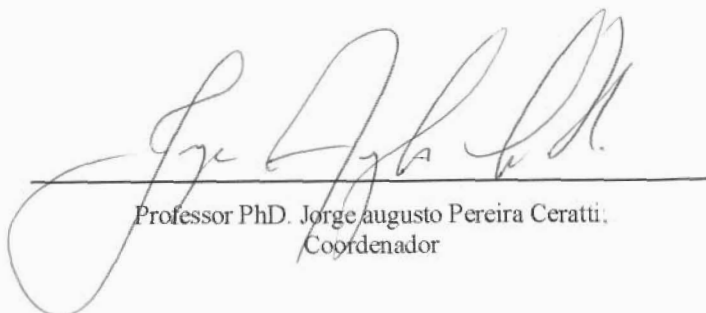
A partir dos levantamentos pode-se concluir que:

- a) Pelo levantamento de macrotextura, verificou-se que a mistura asfalto-borracha utilizada, apresenta uma textura na superfície de rolamento adequada para evitar problemas de deslizamento.
- b) As irregularidades longitudinais foram amenizadas com a camada asfáltica aplicada;
- c) Na maioria do trecho os problemas devido ao afundamento de trilha de roda foi sanado, com a aplicação da camada asfáltica;
- d) A mistura asfalto-borracha apresenta comportamento semelhante a misturas convencionais na questão da densificação posterior com o tráfego;
- e) No levantamento visual contínuo, foi possível verificar um trecho que apresentava problemas, e sua análise demonstrou, que se tratava de um trecho específico onde houve problemas durante a usinagem da mistura;
- f) Esta mistura diminui menos a deflexão do que as misturas convencionais por causa da sua alta deformabilidade;
- g) A execução de misturas asfalto-borracha necessita que seja realizado um maior controle da temperatura durante os processos de usinagem e compactação, por causa, da necessidade destes processos serem realizados com temperatura mais elevada. Esta grande diferença de temperatura entre a mistura e o meio ambiente gera altos gradientes térmicos, resultando no resfriamento rápido da mistura, que dificulta a execução, durante dias frios;

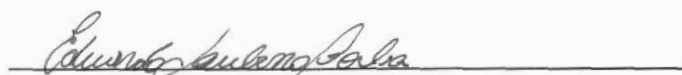
NTT
134
300100

A partir dos ensaios ficou evidente o bom comportamento das misturas asfalto-borracha produzidas pelo Processo Úmido, na camada de rolamento, o que evidencia sua viabilidade técnica para a utilização em rodovias com alto tráfego de veículos

Equipe executora



Professor PhD. Jorge Augusto Pereira Ceratti,
Coordenador



Eduardo Laubino Borba
Equipe técnica