



FATEC-SP

Faculdade de Tecnologia de São Paulo

Departamento de Transportes e Obras de Terra

ANA CAROLINA BERTINI

**AVALIAÇÃO DO MÉTODO DE FRESAGEM ASFÁLTICA
PELO PROCEDIMENTO DNER PRO 269/94 PARA
TRÁFEGO URBANO**

**SÃO PAULO
2012**

ANA CAROLINA BERTINI

**AVALIAÇÃO DO MÉTODO DE FRESAGEM ASFÁLTICA
PELO PROCEDIMENTO DNER PRO 269/94 PARA
TRÁFEGO URBANO**

Monografia apresentada à Faculdade de Tecnologia de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Tecnólogo em Movimento de Terra e Pavimentação.

Orientador: Prof. Me. Sidney Isidro da Silva Junior

Coorientador: Prof. Dr. Edson de Moura

**SÃO PAULO
2012**



FATEC-SP

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO

Departamento de Transporte e Obras de Terra

**Avaliação do Método de Fresagem Asfáltica pelo Procedimento DNER
PRO 269/94 para Tráfego Urbano**

Ana Carolina Bertini

Monografia aprovada pela Banca Avaliadora constituída por:

Prof. Me. Sidney Isidro da Silva Junior
Presidente e Orientador

Prof. Dr. Edson de Moura
Coorientador

Prof. Me. Josué Alves Roso

Prof. Odair de Oliveira Rosa

São Paulo, 27 de novembro de 2012

AGRADECIMENTOS

Primeiramente aos meus pais, Edson Bertini e Magali Rose de Oliveira Bertini, pelo constante incentivo e eterna dedicação quanto aos meus estudos e a minha formação como cidadã e ser pensante.

Ao meu orientador, Prof. Me. Sidney Isidro da Silva Junior, por seu apoio e idéias.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Edson de Moura, que com sua paciência e habilidade nata de ensinar e aprender permitiu que esse trabalho fosse possível de ser realizado. Seus conselhos e orientação foram essenciais.

Aos discentes e funcionários do Departamento de Transportes e Obras de Terra (TOT), pelas portas que sempre estiveram abertas e pelo auxílio e dedicação sempre presentes.

Aos meus amigos de graduação, bem como a todos que me acompanharam ao longo do curso, os quais compartilharam suas experiências pessoais, profissionais e acadêmicas.

RESUMO

O presente trabalho apresenta um estudo teórico sobre a utilização da fresagem asfáltica para a recuperação de vias urbanas. Optou-se por essa técnica porque, dentre as diversas técnicas disponíveis de recuperação de pavimento asfáltico, a reposição da capa em casos de trincamento apresentou-se satisfatória e, por consequência, a fresagem tornou-se fundamental para a adequação das características geométricas das vias e do meio fio. Para a obtenção de dados comparativos optou-se pela utilização das estruturas padrão contempladas nas normas de dimensionamento de pavimentos flexíveis da Prefeitura Municipal de São Paulo (PMSP), as quais de certa forma representam as estruturas modelo de tráfego urbano. Estas foram submetidas à situação-problema de trincas por fadiga e como método de intervenção utilizou-se da fresagem asfáltica seguida da aplicação de uma nova capa. As espessuras de corte e do novo revestimento foram determinadas segundo os parâmetros de dimensionamento da DNER-PRO 269/94, do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). Os resultados obtidos apontam sua eficácia em tráfegos de até $2,0 \times 10^7$ solicitações (tráfego pesado), porém não se exclui sua utilização em tráfegos mais elevados, com perda de funcionalidade pelo aumento excessivo do greide da pista. Conclui-se que o método cumpre com grande funcionalidade sua tarefa de recuperar os pavimentos urbanos, sendo um aliado a manutenção de pavimentos.

Palavras-chave: Pavimentos flexíveis (recuperação). Fresagem asfáltica. Dimensionamento PMSP. Dimensionamento de reforço de pavimento.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 – Estrutura básica de um pavimento flexível | 6 |
| Figura 2.2 – Exemplo da caixa de um pavimento flexível | 7 |
| Figura 2.3 - Exemplo de composições granulométricas de misturas a quente | 9 |
| Figura 2.4 – Classificação dos agregados pétreos | 12 |
| Figura 2.5 – Deformações do pavimento..... | 16 |
| Figura 2.6 – Esquema da bacia de deformação e da deformada..... | 16 |
| Figura 2.7 – Tambor para fresagem rasa | 19 |
| Figura 2.8 – Tambor para fresagem superficial..... | 19 |
| Figura 2.9 – Tambor para fresagem profunda | 20 |
| Figura 2.10 – Tambor para fresagem fina | 20 |
| Figura 2.11 – Tambor para fresagem padrão..... | 21 |
| Figura 2.12 – Tambor para fresagem padrão..... | 21 |
| Figura 2.13 – W 50 DC fresando pequeno raio envolto por um poço de visita | 22 |
| Figura 2.14 – Fresadora Wirtgen de grande porte | 23 |
| Figura 2.16 – Cilindro fresador ou <i>milling drum</i> | 23 |
| Figura 2.17 – Esquema de composição de um dente de corte..... | 24 |
| Figura 2.18 – Alinhamento dos dentes de corte | 25 |
| Figura 2.19 – Correia transportadora depositando material fresado | 26 |
| Figura 2.20 – Trem de fresagem..... | 26 |
| Figura 2.21 – Fresadora W 100 F, da Wirtgen, fresando uma via estreita. | 28 |
| Figura 2.22 – Fresadora W 350 E, da Wirtgen..... | 28 |
| Figura 2.23 – Estrutura de referencia do TECNAPAV | 32 |
| Figura 3.1 – Estrutura 1: Tráfego leve..... | 39 |
| Figura 3.2 – Estrutura 2: Tráfego médio | 41 |
| Figura 3.3 – Estrutura 3: Tráfego meio pesado | 44 |
| Figura 3.4 – Estrutura 4: Tráfego pesado | 47 |
| Figura 3.5 – Estrutura 05: Tráfego muito pesado | 51 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|---|----|
| Gráfico 3.1 – Módulo de resiliência efetivo x Deflexão de projeto – Tráfego leve..... | 40 |
| Gráfico 3.2 – Módulo de resiliência efetivo x Deflexão de projeto – Tráfego médio..... | 42 |
| Gráfico 3.3 – Deflexão após fresagem x Deflexão de projeto – Tráfego médio..... | 43 |
| Gráfico 3.4 – Módulo de resiliência efetivo x Deflexão de projeto – Tráfego meio pesado ... | 45 |
| Gráfico 3.5 – Deflexão após fresagem x Deflexão de projeto – Tráfego meio pesado..... | 46 |
| Gráfico 3.6 – Módulo de resiliência efetivo x Deflexão de projeto – Tráfego pesado | 48 |
| Gráfico 3.7 – Deflexão após fresagem x Deflexão de projeto – Tráfego pesado..... | 49 |
| Gráfico 3.8 – Espessuras excedentes de reforço (HR) – Tráfego pesado..... | 50 |
| Gráfico 3.9 – Módulo de resiliência efetivo x Deflexão de projeto – Tráfego muito pesado .. | 52 |
| Gráfico 3.10 – Módulo de resiliência efetivo x Deflexão de projeto – Tráfego muito pesado | 52 |
| Gráfico 3.11 – Espessuras excedentes de reforço (HR) – Tráfego muito pesado | 53 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|--------------|--|
| BGS | Brita Graduada Simples |
| BGTC | Brita Graduada Tratada com Cimento |
| CA | Concreto Asfáltico |
| CAP | Concreto Asfáltico de Petróleo |
| CAUQ | Concreto Asfáltico Usinado a Quente |
| CBR | <i>California Bearing Ratio</i> (Índice de Suporte Califórnia) |
| DER | Departamento de Estradas de Rodagem |
| DERSA | Desenvolvimento Rodoviário S.A. |
| DNER | Departamento Nacional de Estradas de Rodagem |
| DNIT | Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte |
| EAP | Emulsão Asfáltica de Petróleo |
| IP | Instrução de Projeto |
| PMF | Pré Mistura a Frio |
| PMQ | Pré Misturado a Quente |
| PMSP | Prefeitura Municipal de São Paulo |
| S | Silte |
| SGP | Sistemas de Gerência de Pavimentos |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|--------------------------------|--|
| D_0 | Deflexão na superfície do pavimento |
| D_c | Deflexão característica |
| e_{BC} | Espessura da base cimentada |
| E_{BC} | Módulo de elasticidade da base cimentada |
| e_{BGS} | Espessura da base de brita graduada simples |
| e_{BGS} | Espessura da sub-base de brita graduada simples |
| E_{BGS} | Módulo de resiliência da base |
| e_{BGTC} | Espessura da base de brita graduada tratada com cimento |
| e_{CAUQ} | Espessura de CAUQ |
| E_{CAUQ} | Módulo de elasticidade do concreto asfáltico |
| E_{sub} | Módulo de elasticidade do subleito |
| H_{cg} | Espessura da camada granular |
| h_e | Espessura de mistura betuminosa existente |
| h_{ef} | Espessura de mistura betuminosa efetiva |
| HR | Espessura do reforço em concreto asfáltico |
| MR | Módulo de resiliência |
| n | Ano previsto para execução da restauração, considerando o início como ano zero |
| Q_{ESRD} | Carga total sobre o eixo simples de rodas duplas |
| ϵ_r | Deformação específica axial resiliente |
| ϵ_t | Deformação de tração na fibra inferior do CA |
| σ_d | Tensão-desvio aplicada repetidamente |
| σ_t | Tensão de tração na flexão na base |

SUMÁRIO

| | |
|------------------------------------|----|
| CAPÍTULO 1 | 1 |
| 1 INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 Justificativa | 2 |
| 1.2 Objetivo | 3 |
| 1.3 Metodologia | 3 |
| CAPÍTULO 2 | 5 |
| 2 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA | 5 |
| 2.1 Pavimento flexível | 5 |
| 2.1.1 Composição estrutural | 6 |
| 2.2 Comportamento estrutural | 13 |
| 2.2.1 Módulo de resiliência | 13 |
| 2.2.2 Deflexão..... | 14 |
| 2.3 Fresagem asfáltica..... | 17 |
| 2.3.1 Tipos de fresagem..... | 18 |
| 2.3.2 Fresadora | 22 |
| 2.3.3 Execução..... | 26 |
| 2.4 Manutenção de pavimentos | 29 |
| 2.4.1 DNER-PRO 269/94 | 30 |
| 2.4.2 Análise mecanicista | 35 |
| CAPÍTULO 3 | 37 |
| 3 ESTUDO DE CASO | 37 |
| 3.1 Estruturas analisadas | 37 |
| 3.1.1 Tráfego leve..... | 38 |
| 3.1.2 Tráfego médio..... | 41 |
| 3.1.3 Tráfego meio pesado | 44 |
| 3.1.4 Tráfego pesado | 46 |
| 3.1.5 Tráfego muito pesado | 50 |
| CAPÍTULO 4 | 54 |
| 4 COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES..... | 54 |
| 4.1 Comentários | 54 |
| 4.2 Conclusão..... | 54 |
| REFERÊNCIAS | 56 |

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

A pavimentação rodoviária tem sido objeto de diversos estudos dedicados ao aprimoramento de técnicas de construção e manutenção. Muitos desses trabalhos visam identificar parâmetros de relação entre investimentos versus retornos, priorizando assim as técnicas que permitam melhores resultados pelo menor custo.

É notável que o mesmo não ocorra com a mesma frequência na bibliografia dos pavimentos urbanos, onde a falta de estudos relacionados contradiz a atual problemática socioeconômica vivenciada pelo Brasil. Hoje a população se vê cada vez mais urbana, o que impulsiona o crescimento dos grandes centros e culminam em cidades com elevadas densidades demográficas e enormes fluxos de veículos, (NAKAHARA, 2005).

Nesse cenário, metrópoles como São Paulo adquiriram uma grande sorte de problemas relacionados à Engenharia de Transportes, que vão desde o controle do fluxo de veículos até a condição superficial das vias pavimentadas e não pavimentadas. Isso se traduz em vias cada vez mais congestionadas e com uma qualidade de superfície muito aquém da esperada.

Sabe-se que a sorte de problemas estruturais e funcionais de pavimentos flexíveis é diversa, o que afeta diretamente os princípios básicos da pavimentação. O pavimento por definição tem o objetivo garantir a capacidade de suporte ao tráfego, distribuindo adequadamente as cargas ao subleito, de maneira a fornecer aos usuários uma boa qualidade de rolamento, com segurança, conforto e economia.

A malha pavimentada relaciona-se ao contexto econômico por ser um importante modal logístico por onde se concentra grande parte do transporte como atividade meio das operações socioeconômicas, onde dentro de uma perspectiva de longo prazo deve apresentar um desempenho permanentemente satisfatório para garantir condições que mantenham o fluxo em alto desempenho.

Sabe-se que dentro do perímetro urbano há diversos fatores responsáveis por sua deterioração, onde as que mais se evidenciam é o excesso de carga e em menor escala a má qualidade dos materiais empregados e os projetos contemplados de maneira inadequada.

Contudo, o que mais se evidencia é a falta de manutenção, em especial da preventiva, pois é observado e constatado, até mesmo por leigos, que a manutenção de uma dada via só ocorre quando esta já se apresenta totalmente deteriorada, anulando os princípios da pavimentação.

Portanto, compreender a dinâmica dos pavimentos é essencial para identificar as causas de suas patologias bem como para propor soluções de manutenção e recuperação. Dessa forma, compor o leque de soluções consiste em avaliar as alternativas que ofereçam a melhor técnica, sem desconsiderar que essas devem adequar-se à planilha orçamentária dos municípios.

Quando as rodovias estão com os pavimentos deteriorados funcionalmente a solução de aplicar uma nova capa asfáltica foi e continua como uma opção muito usual e difundida em nossos dias, entretanto é sabido que a capa com problemas de trincamento ainda pode ser reaproveitada como um material de base ou mesmo como camada de rolamento e, dessa possibilidade, surgiram diversas técnicas para o reaproveitamento desse nobre material. Após um estudo mecanicista da capacidade estrutural remanescente do pavimento após a remoção da camada deteriorada determina-se a espessura da capa de rolamento que deverá ser aplicada. Dentre essas técnicas de fresagem tem-se a que utiliza um trem de fresagem/dosagem/aplicação do material fresado *in situ*.

Já entre os pavimentos urbanos o processo de fresagem consiste na utilização de uma fresadora em que o material fresado é removido e o pavimento recebe uma capa asfáltica nova, uma vez que o trem de fresagem é muito longo e nas condições urbanas fica impossibilitado. Porém, nada impede que esse material fresado passe por um processo de beneficiamento e seja novamente aplicado como camada de rolamento, ou ainda, misturado com outro material e seja aproveitado como base ou sub-base.

1.1 Justificativa

Encontrou-se no tema proposto uma oportunidade de analisar a eficácia de um método distinto aos normalmente aplicados no município de São Paulo, uma vez que a estrutura do Dimensionamento PMSP não contempla a técnica de fresagem em suas Instruções de Projeto.

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é avaliar a aplicabilidade do método de fresagem asfáltica com posterior substituição de capa asfáltica em estruturas comprometidas com trincamento por fadiga, verificando sua aplicabilidade em diferentes tipos de tráfego e condições de suporte do subleito.

1.3 Metodologia

Para explanar sobre o tema proposto, este trabalho será organizado em quatro capítulos, dispostos por áreas de interesse, as quais compreendem:

Capítulo 1: INTRODUÇÃO

Nesse capítulo procurar-se-á evidenciar a relevância do tema bem como apresentar o objetivo, a justificativa e a metodologia do trabalho.

Capítulo 2: PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Definirá inicialmente alguns conceitos acerca do que é pavimento, suas funcionalidades e composição estrutural, apresentando os materiais de pavimentação comumente utilizados pela PMSP.

Apontará o funcionamento mecânico dos pavimentos, ressaltando a relação existente entre a deflexão do pavimento e o módulo de resiliência em estruturas comprometidas por trincamento por fadiga.

Abordará a história da fresagem asfáltica e seu emprego corrente no país, citando os tipos e aplicações de cada categoria de fresagem, bem como abordará o equipamento de fresa e suas propriedades e seu emprego decisivo na recuperação do pavimento asfáltico urbano.

Por fim, definirá alguns conceitos quanto à manutenção de pavimentos, avaliando a empregabilidade da norma DNER-PRO 269/94, indicando o procedimento para determinação da espessura de corte e reforço de pavimento, além de citar a necessidade de se realizar a análise mecanicista.

Capítulo 3: ESTUDO DE CASO

Para avaliação dos conceitos abordados serão analisadas estruturas-padrão fornecidas pelo Dimensionamento PMSP, onde estas passarão pela situação problema de trincas por fadiga e posterior recape, sendo analisados os resultados obtidos e sua aplicabilidade no meio urbano.

Capítulo 4: COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Mediante os resultados apresentados no estudo de caso serão analisados os pontos de interesse na técnica de fresagem asfáltica, concluindo o seu grau de desempenho como técnica para recuperação asfáltica urbana.

CAPÍTULO 2

2 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo procurar-se-á cursar a revisão bibliográfica identificando as estruturas que compõem o pavimento asfáltico, bem como enunciar tópicos acerca da manutenção de pavimentos flexíveis e o emprego da fresagem da capa asfáltica com posterior aplicação de revestimento novo, dimensionado através da norma **DNER-PRO 269/94** – Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis – TECNAPAV. Cabe observar que esse trabalho objetiva a recuperação de pavimentos flexíveis de vias urbanas, entretanto, quase a totalidade da bibliografia consultada foi obtida através dos manuais do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (DNIT). Ocorre que o tráfego e, por concepção, os tipos de estruturas empregadas em pavimentos urbanos, salvo algumas exceções, são semelhantes às empregadas em rodovias, sendo admitida a utilização de conteúdo referente à pavimentação rodoviária.

Salienta-se também que a prática de fresagem asfáltica é mais utilizada em rodovias e por esse motivo o acervo bibliográfico advém de conteúdo rodoviário.

2.1 Pavimento flexível

Pavimento é uma estrutura composta por múltiplas camadas de espessuras finitas, compostas por materiais de diferentes resistências e deformabilidades, executada sobre a superfície final de terraplenagem, com intuito técnico e econômico de resistir aos esforços externos oriundos do tráfego e do clima, visando garantir a melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança.

De acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (DNIT, 2006), os pavimentos, de forma geral, são classificados em flexíveis, semirrígidos e rígidos, os quais comportam as seguintes estruturas:

- **Flexível:** pavimento composto por múltiplas camadas, as quais sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado, de forma que a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas;
- **Semirrígido:** pavimento que possui base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias, a qual apresenta atributos de material rígido;

- **Rígido:** revestimento de elevada rigidez em relação às camadas inferiores e, portanto, absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado.

Para compreender o funcionamento estrutural dos pavimentos flexível, objeto do referente estudo, há que se definir inicialmente a função das camadas que o compõe. O comportamento estrutural do conjunto deriva da espessura de cada uma de suas camadas, bem como de sua rigidez, composição granular e da interação entre camadas. Também é objeto de estudo analisar as características do subleito no que diz respeito a sua capacidade de suporte.

Os revestimentos das estruturas do pavimento, dependendo de sua espessura, são submetidos a esforços de compressão e de tração devidos à flexão, ficando as demais camadas submetidas principalmente à compressão, (BERNUCCI *et al.*, 2006).

2.1.1 Composição estrutural

A estrutura padrão de um pavimento flexível, representada pela Figura 2.1, é composta por diversas camadas granulares de comportamentos e espessuras heterogêneas.

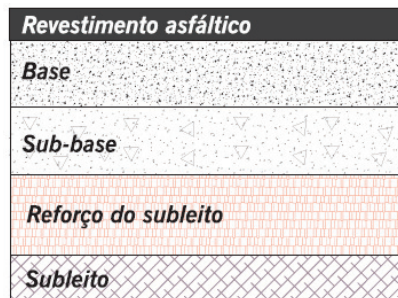


Figura 2.1 – Estrutura básica de um pavimento flexível
Fonte: BERNUCCI *et al.* (2006)

Sua seção transversal é composta por diversos elementos, subdividindo-se em (DNIT, 2006):

- **Subleito:** estrutura de apoio à fundação do pavimento;
- **Reforço de subleito:** camada disposta sobre o subleito, a qual possui o objetivo de reforçar o leito da pista, possuindo qualidade superior ao subleito e inferior à sub-base;
- **Sub-base:** camada complementar à base;
- **Base:** camada destinada a resistir e distribuir os esforços oriundos do tráfego;

- **Revestimento:** camada com característica normalmente impermeável, que recebe diretamente a ação do tráfego, possuindo características de garantir a comodidade, segurança e resistência ao desgaste.

Estas estruturas são constituídas por materiais granulares, solos ou misturas de solos, sem o emprego de agentes cimentantes. A espessura das camadas depende diretamente da solicitação de tráfego a qual será submetida à estrutura, podendo em determinados casos suprimir uma ou mais camadas da estrutura.

A caixa de pavimento, constituída por estas camadas, pode ser ilustrada pelo esquema da Figura 2.2, que representa a constituição de um perfil de pavimento.

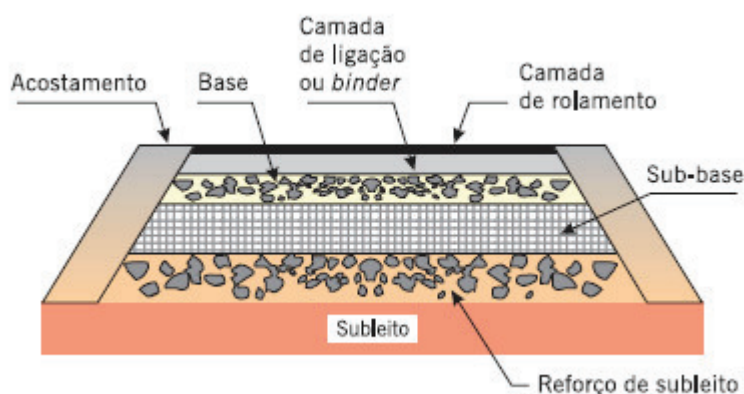


Figura 2.2 – Exemplo da caixa de um pavimento flexível
Fonte: BERNUCCI *et al* (2006)

2.1.1.1 Revestimento asfáltico

O revestimento asfáltico é constituído pela mistura íntima de cimento asfáltico de petróleo (CAP) e agregados. Quando processadas em usina específica são denominadas misturas usinadas – fixas ou móveis. Há também as misturas processadas na própria pista, como no caso de tratamentos superficiais.

Além da classificação de usinagem há a divisão quanto ao tipo de ligante asfáltico empregado. Misturas a quente utilizam o CAP, enquanto as misturas a frio empregam o uso de emulsão asfáltica de petróleo (EAP), que nada mais são do que concretos asfálticos diluídos em água e solvente apropriado. Essa diferenciação ocorre por conta das propriedades dos concretos e emulsões asfálticas quanto à temperatura de execução.

Há também outros tipos de misturas asfálticas que se processam em usinas móveis especiais, que promovem a mistura agregado-ligante no próprio equipamento, sendo classificadas em novas misturas relativamente fluidas e misturas recicladas com o uso de fresadoras-recicladoras (BERNUCCI *et al.*, 2006). Entre as misturas fluidas pode-se citar:

- **Lama asfáltica:** auxilia na manutenção de pavimentos, especialmente nos revestimentos com desgaste superficial e pequeno grau de trincamento. Impermeabiliza a superfície através do selamento das trincas, bem como rejuvenesce o revestimento existente oxidado. As lamas podem ser aplicadas a espessuras de 3 a 4 mm;
- **Microrrevestimento:** de acordo com Bernucci *et al.* (2006), a técnica de microrrevestimento pode ser considerada uma evolução das lamas asfálticas, por compor emulsões modificadas com polímero que aumentam sua vida útil. Assume funções semelhantes a da lama, podendo ser utilizado também como revestimento de vias com baixo volume de tráfego ou como camada intermediária anti-reflexão de trincas em projetos de reforço estrutural;

Já os tratamentos superficiais, são misturas aplicadas diretamente na pista. Constituem-se por uma ou mais camadas de ligante asfáltico, modificado ou não por polímero e uma ou mais aplicações sucessivas e alternadas de agregado mineral (DER, 2006). Auxiliam na impermeabilização do pavimento, proporcionando um revestimento antiderrapante. Proporciona também um revestimento de alta flexibilidade.

As misturas a quente, conhecidas como o concreto asfáltico (CA) ou concreto asfáltico betuminoso a quente (CAUQ), são misturas previamente graduadas de agregados de vários tamanhos e ligante asfáltico (CAP), aquecidos a temperaturas pré-determinadas em função da característica viscosidade-temperatura do CAP, a qual é posteriormente transportada por caminhão para a pista, onde é lançada por equipamento apropriado (vibro acabadora) e compactada até determinado grau de compressão.

Estas são classificadas de acordo com suas curvas granulométricas. Segundo o DNIT (2006), define-se curva granulométrica como a curva que representa as percentagens acumuladas, em peso, de partículas de diferentes dimensões, em função de abertura da malha da peneira pela qual passam.

Segundo Bernucci *et al.* (2006), as curvas granulométricas das misturas às dividem em (Figura 2.3):

- **Graduação densa:** curva granulométrica contínua e bem-graduada, de esqueleto mineral denso, onde agregados de dimensões menores preenchem os vazios dos agregados maiores;
- **Graduação aberta:** curva granulométrica uniforme com agregados quase exclusivamente de um mesmo tamanho, de esqueleto mineral com muitos vazios interconectados, com insuficiência de material fino (menor que 0,075mm), com o objetivo de tornar a mistura com elevado volume de vazios com ar e, portanto, drenante, possibilitando a percolação de água no interior da mistura asfáltica;
- **Graduação descontínua:** curva granulométrica com proporcionamento dos grãos de maiores dimensões em quantidade dominante em relação aos grãos de menores dimensões, completados por certa quantidade de finos, de forma a ter uma curva descontínua em certas peneiras, onde o esqueleto mineral apresenta maior resistência à deformação permanente com o maior número de contatos entre os agregados graúdos.



Figura 2.3 - Exemplo de composições granulométricas de misturas a quente (densa, aberta e descontínua)

Fonte: BERNUCCI *et al.* (2006)

Já as misturas a frio, entre elas o pré-misturado a frio (PMF), são misturas que empregam emulsões asfálticas como ligante para envolver os agregados. Proporcionadas de forma conveniente com curva granulométrica apropriada, atendem a uma resistência mecânica específica, onde a mistura é realizada sem o aquecimento dos agregados. Em determinados casos o ligante é ligeiramente aquecido, sendo usual o seu uso na temperatura ambiente.

2.1.1.2 Base, sub-base e reforço de subleito

As camadas adjacentes à capa asfáltica são denominadas base, sub-base e reforço de subleito e são compostas por agregados (solos, rochas ou mistura de ambos, com ou sem aditivos). Agregado é um material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, o qual apresenta dimensões e propriedades adequadas.

O dimensionamento das camadas, como aponta o DNIT (2006), é efetuada em referência a capacidade de suporte do subleito, para que as cargas sejam distribuídas de maneira uniforme, protegendo o subleito quanto à ruptura por cisalhamento ou acúmulo de deformações permanentes. Contudo, mesmo um pavimento projetado quanto a esse critério não está isento do fenômeno de fadiga, (PINTO, 1991).

Para o uso em pavimentação classificam-se os agregados de acordo com seu diâmetro nominal, podendo ser classificados em agregado graúdo, agregado miúdo e material de enchimento (fíler).

O agregado graúdo é aquele proveniente da segregação mecânica de rochas, com dimensões maiores do que 2,0 mm, ou seja, retido na peneira n.º 10. Apresentam-se como fragmentosãos e duráveis, livre de torrões de argila e substâncias nocivas.

O agregado miúdo é composto por agregados de dimensões maiores que 0,075mm e menores que 2,0 mm, são estes as areias, pó-de-pedra, etc..

Já o material de enchimento, também conhecido como fíler, constitui-se por materiais minerais de graduação fina, onde pelo menos 65% das partículas são menores que 0,075mm, podendo ser classificados como fíler o uso do cimento Portland, cal extinta, pós-calcários, cinza volante, etc. Para material oriundo da própria rocha, fíler é o material necessariamente de diâmetro inferior a 0,075 mm.

2.1.1.2.1 Solos

Os solos, como define o DNIT (2006), são materiais resultantes da decomposição das rochas pela ação do intemperismo e, como tanto, possui propriedades oriundas da rocha de origem, bem como de fatores geológicos que compuseram sua formação.

Para a engenharia rodoviária, portanto, solo pode ser definido como um material orgânico, quando formado em contato com matéria orgânica, ou inorgânico, inconsolidado ou parcialmente cimentado, encontrado na superfície da terra, (DNIT, 2006).

A classificação dos solos pode ser feita através de sua composição granulométrica, plasticidade, consistência ou compacidade, bem como fatores de identificação visual, como cor, cheiro, friabilidade e presença de outros materiais (conchas, materiais vegetais, micas, etc.), (DNIT, 2006).

No Brasil a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), com a norma ABNT NBR 6502/95 – Terminologia – Rochas e Solos, definem como:

- **Bloco de rocha:** fragmentos de rocha transportados ou não, com diâmetro superior a 1,0 m.
- **Matacão:** fragmento de rocha transportado ou não, comumente arredondado por intemperismo ou abrasão, com uma dimensão compreendida entre 200 mm e 1,0 m.
- **Pedra de mão:** fragmento de rocha com diâmetro compreendido entre 60 mm e 200 mm.
- **Pedregulho:** solos formados por minerais ou partículas de rocha, com diâmetro compreendido entre 2,0 e 60,0 mm. Quando arredondados ou semi-arredondados, são denominados cascalhos ou seixos. Divide-se quanto ao diâmetro em: pedregulho fino – (2 a 6 mm), pedregulho médio (6 a 20 mm) e pedregulho grosso (20 a 60 mm).
- **Areia:** solo não coesivo e não plástico formado por minerais ou partículas de rochas com diâmetros compreendidos entre 0,06 mm e 2,0 mm. As areias de acordo com o diâmetro classificam-se em: areia fina (0,06 mm a 0,2 mm), areia média (0,2 mm a 0,6 mm) e areia grossa (0,6 mm a 2,0 mm).
- **Silte:** solo que apresenta baixo ou nenhuma plasticidade, baixa resistência quando seco ao ar. Suas propriedades dominantes são devidas à parte constituída pela fração silte. É formado por partículas com diâmetros compreendidos entre 0,002 mm e 0,06 mm

Entre os materiais mais empregados cita-se: solo-agregado; solo natural; solo melhorado com cimento ou cal. Há também a combinação com agentes cimentantes, gerando o solo-cimento, solo-cal, solo-cal-cimento, e também há o emprego de misturas asfálticas para a obtenção de solo-asfalto e solo-emulsão.

2.1.1.2.2 Rochas

Os materiais pétreos podem ser naturais ou artificiais (DNIT, 2006). Os naturais são aqueles utilizados na forma com que são encontrados, como os pedregulhos, enquanto os artificiais sofrem o fenômeno de britagem.

O desempenho de serviço de um determinado agregado pétreo, segundo Bernucci *et al.* (2008) depende das propriedades geológicas da rocha de origem, sendo importante informações sobre o tipo de rocha, sua composição mineralógica, sua composição química, sua granulização, seu grau de alteração, sua tendência à degradação, abrasão ou fratura sob tráfego e o potencial de adesão do ligante asfáltico em sua superfície.

São classificados segundo sua natureza, tamanhos e distribuição dos grãos, representados pela Figura 2.4:

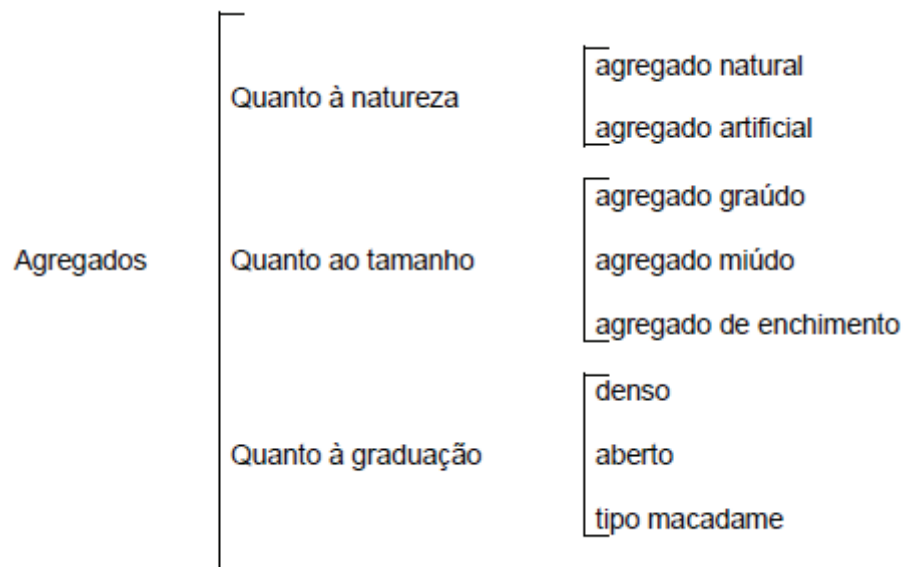


Figura 2.4 – Classificação dos agregados pétreos
Fonte: DNIT (2006)

Os materiais mais empregados em pavimentação da classe dos granulares são: brita graduada simples (BGS) e bica ou brita corrida; macadame hidráulico; macadame a seco. Há também a utilização da brita graduada tratada com cimento (BGTC) para a obtenção de uma camada semirrígida, bem como a utilização de emulsão asfáltica para a obtenção de macadame betuminoso.

2.1.1.3 Subleito

O subleito é o terreno de fundação que comporta a estrutura do pavimento, sendo assim motivo de estudo. A estrutura da camada de fundação é considerada até a profundidade onde as cargas impostas pelo tráfego atuam de forma significativa o que segundo o DNIT (2006) situa-se numa faixa de 0,60 a 1,50 m.

É de interesse o conhecimento da capacidade de suporte do subleito, conhecida através do *California Bearing Ratio* (CBR) ou Índice de Suporte Califórnia, ensaio preconizado pelo DNER, o qual consiste na determinação da relação entre a pressão necessária para produzir a mesma penetração numa brita padronizada (DNIT, 2006). O valor dessa relação é expresso em porcentagem, relacionando a capacidade de suporte dos solos constituintes do subleito.

2.2 Comportamento estrutural

Como explanado no item 2.1, o pavimento é formado por múltiplas camadas, compostas por materiais granulares de espessuras variáveis e comportamentos heterogêneos. Esses fatores estimulam a investigação acerca do comportamento estrutural do conjunto, para que se possa prever a melhor forma de dimensioná-lo, bem como conservá-lo.

Nessa seção serão introduzidos os conceitos e procedimentos utilizados para a condução dos levantamentos e da avaliação da condição estrutural do pavimento. São apresentadas noções básicas sobre deformabilidade de pavimentos, conceituando deformações permanentes e recuperáveis. Comenta-se também sobre os parâmetros deflectométricos de interesse.

Como aponta Pinto (1991), sabe-se que os mais severos defeitos em estruturas flexíveis são as solicitações mecânicas de flexão repetida, responsável pela fadiga do material, associada ao trincamento do revestimento, e a compressão simples, que conduz ao acúmulo de deformações permanentes.

Quanto à aplicação dos parâmetros deflectométricos à avaliação estrutural, analisa-se o emprego da deflexão máxima.

Ao final desta seção são abordados dois parâmetros de resistência importantes para caracterizar a capacidade estrutural do pavimento e suas respectivas camadas, representada pelo módulo resiliente, (DNIT 2006).

2.2.1 Módulo de resiliência

Segundo o manual de restauração do DNIT (2006), o módulo de resiliência surgiu da constatação de que não bastava apenas o valor do CBR para dimensionar corretamente a estrutura de um pavimento, uma vez que os materiais apresentam fenômeno da fadiga, responsável pela diminuição da capacidade de suporte ao longo de seu período de vida.

O módulo de resiliência trabalha com a análise dos estados de tensão-deformação de estruturas de pavimentos por meios computacionais, através da medição de propriedades mecânicas do módulo de resiliência e é expresso pela seguinte expressão:

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r}$$

Onde:

MR = Módulo de resiliência;

σd = Tensão-desvio aplicada repetidamente;

ϵr = Deformação específica axial resiliente correspondente a um número particular de repetição da tensão-desvio.

As deformações resilientes consistem em deformações elásticas, portanto, recuperáveis, caracterizando um período em que o material possui qualidades elásticas de deformação e recuperação. Entretanto, não variam necessariamente de modo linear com as tensões aplicadas (DNIT, 2006), apresentando no período final de vida útil uma deformação plástica, onde tensões geram deformações permanentes.

2.2.2 Deflexão

As deflexões ou deformações são formadas através da ação das cargas de tráfego sobre o pavimento. Quando cessada a ação da carga, a deflexão do pavimento é recuperada rapidamente. Parcela desse deslocamento é permanente, não recuperável, e parcela é resiliente, recuperável (BERNUCCI *et al.*, 2006).

As deformações permanentes são aquelas que permanecem mesmo após cessar o efeito de atuação da carga, enquanto as deformações recuperáveis representam o comportamento elástico da estrutura, ainda que o pavimento não seja concebido como uma estrutura elástica. A partir desse tipo de deflexão ocorre o arqueamento das camadas do pavimento, sendo responsável pelo fenômeno de fadiga das camadas betuminosas e cimentadas, (DNIT, 2006)

Como pondera Pinto (1991), fadiga pode ser descrita como

o processo de deterioração estrutural que sofre um material quando submetido a um estado de tensões e de deformações repetidas, resultando em trincas ou fratura completa, após um número suficiente de repetições do carregamento, ou seja, é a perda de resistência que o material sofre, quando solicitado repetidamente por uma carga.

Pinto (1991) aponta também que diversos são os fatores que afetam a resistência à fadiga, subdivididos em:

- **Fatores de Carga:** (a) Magnitude do carregamento; (b) Tipo do carregamento; tensão ou deformação controlada; (c) Frequência, duração e intervalo de tempo entre aplicações sucessivas do carregamento; (d) História de tensões: carregamento simples ou composto; (e) Forma do carregamento: triangular, quadrado, etc.
- **Fatores de Mistura:** (a) Tipo de agregado, forma e textura; (b) Granulometria do agregado; (c) Penetração do asfalto; (d) Teor de asfalto; (e) Temperatura.
- **Fatores Ambientais:** (a) Temperatura; (b) Umidade.
- **Outras Variáveis:** (a) Módulo resiliente ou de rigidez; (b) Índice de vazios.

A fadiga está associada ao trincamento do revestimento, sendo este o início de uma fase de deterioração estrutural que modifica o seu desempenho, (Pinto, 1991). Portanto, é importante conhecer as características de ruptura dos materiais envolvidos na construção dos pavimentos, pois é através do comportamento mecânico da estrutura que se aborda os projetos de dimensionamento e recuperação estrutural.

Desse modo, o estudo das deflexões é fundamental para a compreensão do comportamento dos pavimentos, já que estas refletem em última análise as condições estruturais das diversas camadas e do próprio subleito (DNIT, 2006).

A magnitude destas deformações é variável e dependente não só da geometria do carregamento, do valor da carga e da pressão de inflação do pneu, como também da posição do ponto de medida em relação à posição da carga, como ilustra a Figura 2.5:

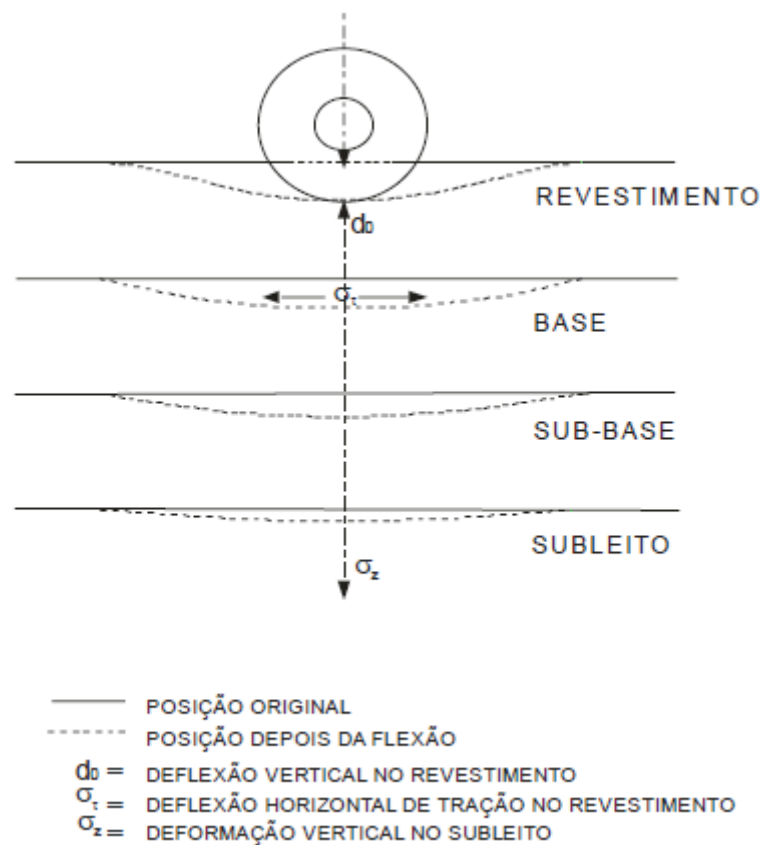


Figura 2.5 – Deformações do pavimento
 Fonte: DNIT (2006)

A figura 2.6 ilustra a influencia de um eixo de roda dupla estática e a área anexa à carga que sofrerá deformação:

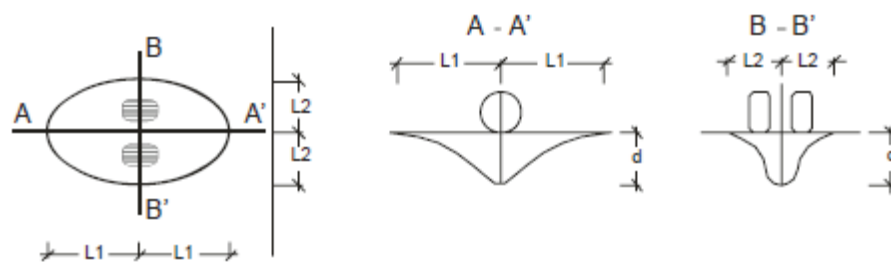


Figura 2.6 – Esquema da bacia de deformação e da deformada
 Fonte: DNIT (2006)

Entre os valores de maior importância, está a deflexão máxima recuperável, uma vez que este é um importante parâmetro para a compreensão do comportamento da estrutura. Quanto maior o seu valor, mais elástica ou resiliente é a estrutura. Desse modo, conclui-se que os pavimentos mais sadios são aqueles que fletam menos.

Para a medição da deflexão em campo utilizam-se ensaios não destrutivos, que avaliam a deflexão recuperável máxima na superfície do revestimento (d_0), sendo bastante apropriados para avaliação da capacidade estrutural. Entre os equipamentos utilizados para a medição, o de uso mais corrente são as vigas de deflexão, entre elas a viga Benkelman, que medem a resposta do pavimento submetido a um carregamento estático ou a aplicação de uma carga em movimento vagaroso.

2.3 Fresagem asfáltica

Entre as alternativas de recuperação de pavimentos está a fresagem asfáltica, que, segundo o Departamento de Estradas de Rodagem (DER), define-se como a ação de corte ou desbaste de uma ou mais camadas do pavimento por meio de processo mecânico (DER, 2006). É um procedimento realizado através de cortes por movimento rotativo contínuo, seguido de elevação do material fresado para caçamba do caminhão basculante.

A fresagem deve produzir uma superfície de textura aparentemente uniforme, sobre o qual o rolamento do tráfego seja suave (DER, 2006) e tem por finalidade a remoção do pavimento previamente à execução de novo revestimento asfáltico e tem aplicação principalmente nas áreas de ocorrência de desgaste por remendos em mau estado, rupturas plásticas, corrugações, concentração de trincas por fadiga, entre outros defeitos.

Aplica-se também na remoção do revestimento betuminoso sobre obras de arte especiais, em áreas de intensa deterioração e também para a regularização de pavimento de encontros e na melhoria do coeficiente de atrito em pistas de alto índice de derrapagem.

A origem do termo fresagem remonta à técnica de desbaste ou corte de metais, originária da área de mecânica, sendo realizada por meio de uma engrenagem motora constituída de um cortador giratório de ângulos diversos, ou de varias fresas, em movimento giratório contínuo.

Segundo Bonfim (2007) a fresagem asfáltica teve início na necessidade da criação de um sistema de reciclagem e recuperação asfáltica, sendo estimulada pela crise do petróleo na década de 1970, onde a escassez de materiais péticos, em conjunto com a crise econômica internacional, trouxe a necessidade de reprocessar os materiais de pavimentação em pistas deterioradas, por meio da reciclagem, de forma a restaurar as condições de trafegabilidade de vias a níveis satisfatórios, tanto do ponto de vista técnico quanto financeiro.

Inicialmente, o material era extraído das pistas por meio da escarificação do pavimento e levado para processamento em usinas (BONFIM, 2007), porém a técnica mostrou-se inadequada para tal aplicação, uma vez que o material retirado vinha em pedaços muito grandes, o que exigia uma posterior rebritagem para que pudesse ser reutilizado.

O equipamento de fresagem foi concebido a partir da segunda metade da década de 1970 simultaneamente entre Europa e América do Norte, onde se mostrou adequado por possibilitar e garantir o desbaste do pavimento em profundidades pré-determinadas, (BONFIM, 2007).

A fresagem asfáltica é uma técnica relativamente nova de recuperação, manutenção e reabilitação de pavimentos. No Brasil o emprego do primeiro equipamento deu-se no ano de 1980, na restauração da Via Anchieta, para o Desenvolvimento Rodoviário S.A. (DERSA).

2.3.1 Tipos de fresagem

A fresagem do pavimento asfáltico é uma técnica constantemente aplicada no processo de restauração de pavimentos deteriorados, principalmente em problemas tipicamente urbanos, uma vez que mantém a cota da pista, preserva os sistemas de drenagem pluvial e atenua o efeito de trincas.

Por seu amplo espectro de atuações, os equipamentos de fresa se moldaram para atingir diversas modalidades de serviço, tendo seus serviços classificadas em relação ao corte e em relação à rugosidade. Pode ser executada a frio ou a quente, onde a elevação da temperatura tem por objetivo preservar a granulometria do material fresado.

2.3.1.1 Classificação em relação ao corte

A fresagem asfáltica, de acordo com a profundidade de execução pode ser classificada em rasa, superficial e profunda, onde cada profundidade possui uma função específica de serviço.

Segundo Bonfim (2007), fresagem rasa é aquela que atinge as camadas superiores do pavimento, atingindo um corte usual de 5 cm, o qual pode chegar à camada de ligação em alguns casos. Utiliza-se o procedimento para correção de defeitos funcionais e remendos superficiais, tendo sua principal aplicação em vias urbanas, (Figura 2.7).

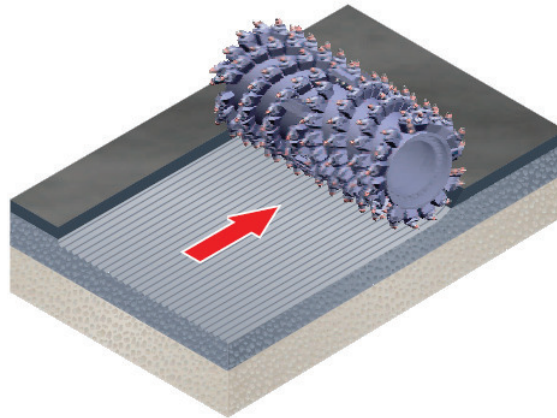


Figura 2.7 – Tambor para fresagem rasa
Fonte: WIRTGEN (2011)

A fresagem superficial ou de regularização é destinada à correção de defeitos existentes na superfície do pavimento. Possui extrema qualidade de acabamento o qual pode dispensar a posterior aplicação de capa asfáltica, pois sua superfície apresenta qualidade de rolamento, ainda que de forma não muito confortável.

Também se engloba nesse grupo aqueles equipamentos utilizados em intervenções que visem à melhoria das condições de aderência pneu-pavimento, (Figura 2.8).

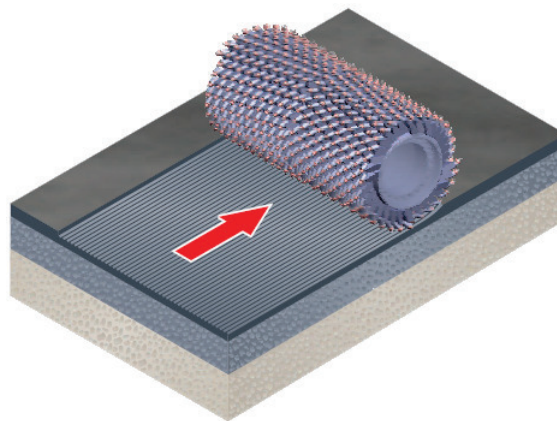


Figura 2.8 – Tambor para fresagem superficial
Fonte: WIRTGEN (2011)

Já a fresagem profunda possui altura de corte de até 10 cm de profundidade, a qual implica na remoção não só da camada de revestimento e de ligação quanto também à camada de base e, por vezes, até a camada de sub-base do pavimento. O procedimento é utilizado para correções estruturais.

Quanto ao aspecto funcional, esse procedimento visa principalmente à segurança e o restabelecimento das condições “ideais” de atuação dos dispositivos de drenagem superficial (BONFIM, 2007) e aplica-se também na correção do greide da pista e para pequenos remendos e reenquadramento de buracos, (Figura 2.9).

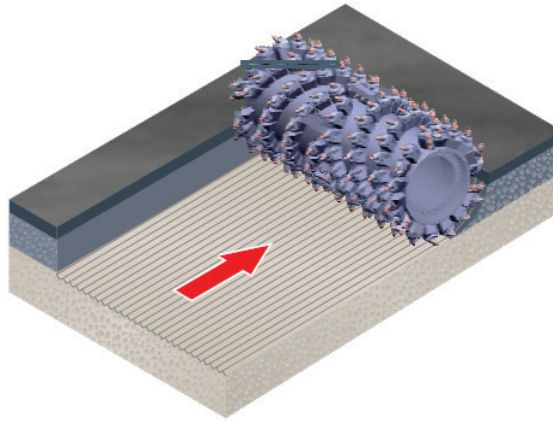


Figura 2.9 – Tambor para fresagem profunda
Fonte: WIRTGEN (2011)

2.3.1.2 Classificação em relação à rugosidade

Como aponta Bonfim (2007), podem-se classificar os tipos de fresagem também quanto à rugosidade resultante na pista, onde como fresagem padrão, fresagem fina e microfresagem. A rugosidade está ligada ao tipo de cilindro utilizado na execução da fresagem e a velocidade de operação

A fresagem fina (*fine milling*) é resultado da execução com cilindros fresadores com distância lateral entre dentes de corte (*bits*) de aproximadamente 8 mm, o que resulta em sulcos menores e menor rugosidade da pista após a fresagem. É utilizada para a regularização de vias por possibilitar melhores condições de trafegabilidade ao usuário, (Figura 2.10).

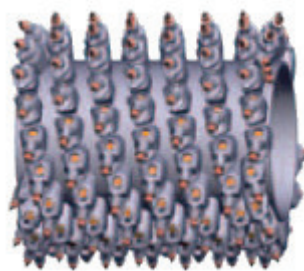


Figura 2.10 – Tambor para fresagem fina
Fonte: WIRTGEN (2011)

A fresagem padrão ou *standard*, primeiro tipo de fresagem introduzido no Brasil, é resultante do cilindro padrão dos equipamentos, tendo uma distância de 15 mm entre dentes. Utiliza-se esse tipo de fresagem para desbaste de camada especificada para posterior aplicação de revestimento asfáltico. Apresenta-se na Figura 2.11 o cilindro com a disposição dos dentes.

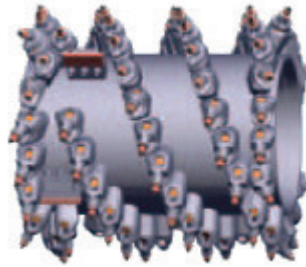


Figura 2.11 – Tambor para fresagem padrão
Fonte: WIRTGEN (2011)

A microfresagem é resultante da fresagem com cilindro dotado de dentes com espaçamento de 2 a 3 mm e consiste na remoção delgada do revestimento, visando à adequação do perfil longitudinal bem como para retirada de sinalização horizontal para execução de novo layout. O cilindro com os respectivos dentes (Figura 2.12), comparativamente, com o cilindro standard a disposição dos dentes são bem mais próximos.

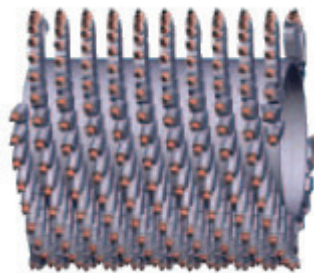


Figura 2.12 – Tambor para microfresagem
Fonte: WIRTGEN (2011)

Dentre as aplicações da microfresagem podemos citar:

- Texturização: melhoria da aderência pneu-pavimento com a criação de sulcos, os quais aumentam a segurança no que refere a derrapagens;
- Correção de greide: retira pequenas deformações como a de trilha de rodas (desde que seja de pequena profundidade), favorecendo desta forma a drenagem superficial, o que contribui para a redução da aquaplanagem;

- Correção de pequenas irregularidades;
- Preparo da superfície do pavimento para a aplicação de micro pavimento, com a qual se podem eliminar as deformações que aumentariam a concentração da emulsão, e consequentemente provocariam espelhamento e exsudação.

2.3.2 Fresadora

A fresadora, máquina desenvolvida para a operação da fresagem, é um equipamento composto por diversos elementos, onde cada um ocupa uma função pré-determinada, contribuindo com certo grau de importância para o sucesso da operação, (BONFIM, 2007). As fresadoras se classificam de acordo com o porte do equipamento, em pequeno, médio e grande porte.

Fresadoras de pequeno porte destinam-se a pequenas reabilitações na via, sendo candidatas ideais para esse tipo de trabalho. A estrutura compacta e o pequeno raio de corte permitem um trabalho com a maior precisão até mesmo em locais confinados, além de executar a remoção de sinalização horizontal para novos projetos de *layout*. Os modelos da Wirtgen (2011) oferecem uma largura de corte de 0,35m a 1,30m, sendo essa largura variável de acordo com o fabricante, (Figura 2.13).



Figura 2.13 – W 50 DC fresando pequeno raio envolto por um poço de visita
Fonte: WIRTGEN (2011)

Fresadoras de médio e grande porte (Figura 2.14), modelos de uso corrente no mercado nacional, atuam nas mais diversas obras, sendo dimensionada de acordo com a produção do equipamento, largura de corte e velocidade de operação, sendo as de grande porte ideais para o uso em rodovias e as de médio para uso urbano, porém não há uma regra para isso.



Figura 2.14 – Fresadora Wirtgen de grande porte
Fonte: WIRTGEN (2011)

Entre os elementos que compõe o conjunto da fresa cita-se como o principal componente o cilindro fresador ou *milling drum*, (Figura 2.15), tambor rígido construído em aço especial, no qual são fixados os dentes. O cilindro fresador gira em alta rotação e quando acionado inicia o desbaste de espessura do pavimento, sendo acionado por intermédio de correntes, correias ou motores hidráulicos.



Figura 2.15 – Cilindro fresador ou *milling drum*
Fonte: WIRTGEN (2011)

São classificados de acordo com o sistema de fixação dos dentes de corte, o qual varia de fabricante para fabricante. Podem ser divididos em sistema fixo, segmentado ou por troca rápida, (WIRTGEN, 2011).

Como exposto anteriormente o tambor dos cilindros é responsável pela qualidade e caracterização do serviço, definindo assim a rugosidade final da superfície de acordo com o número e a densidade de dentes do tambor.

Tão fundamental quanto o cilindro fresador são os dentes de corte, *cutting tools* ou bits (termo corrente na literatura brasileira), responsáveis pelas pontas de ataque que agem diretamente no pavimento, provocando o seu desgaste, (BONFIM, 2007).

Os dentes de corte possuem um anel cilíndrico que envolve sua base para que os mesmos sejam fixados sob pressão no interior do suporte, possibilitando girarem livremente durante o processo de fresagem, de forma a desgastá-los por igual, (Figura 2.16).

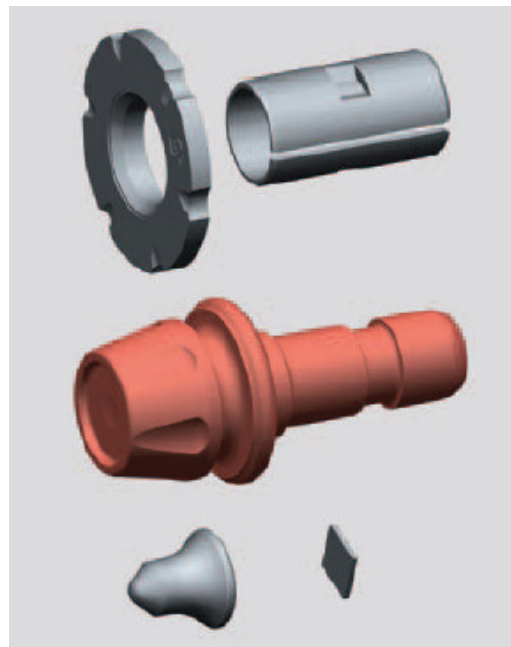


Figura 2.16 – Esquema de composição de um dente de corte
Fonte: WIRTGEN (2007)

Por consequência de sua função primordial na fresagem, os dentes de corte devem apresentar superfície de desgaste uniforme, de maneira que se mantenha a qualidade do serviço e consuma a peça metálica de uniforme. Quando a presença de irregularidades das dimensões dos dentes e/ou o alinhamento ocorrem, (Figura 2.17), o serviço é automaticamente prejudicado, sendo necessária a troca dos bits.

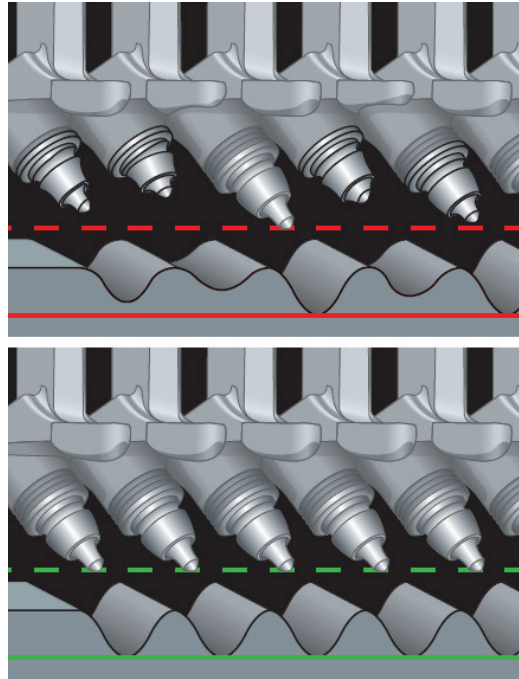


Figura 2.17 – Alinhamento dos dentes de corte
Fonte: WIRTGEN (2007)

Para o término de processo de fresagem há a aplicação de raspadores, peças forjadas em aço e metal duro fixados com parafusos na parte inferior da tampa da caixa do cilindro fresador.

Como os equipamentos de fresagem não possuem sistema para aspiração e coleta de material fresado, o que fazem é lançá-lo na correia transportadora, que a partir do momento em que a caixa do cilindro fresador encontra-se com volume suficiente o material é carregado pela correia. Para que isso ocorra há a contribuição dos raspadores, que auxiliam na coleta dos restos de material.

Segundo Bonfim (2007) também é função dos raspadores minimizar a presença de sulcos resultantes do corte do cilindro, atuando com certa pressão sobre a superfície de modo a deixar o mínimo de resíduo de material granular.

Para o transporte do material granular emprega-se a correia transportadora (Figura 2.18), parte do equipamento que eleva o mesmo, para que este seja depositado na caçamba dos caminhões basculantes para transporte em local determinado. A posição da correia pode ser tanto frontal como dianteira, o que depende do modelo do equipamento empregado, (WIRTGEN, 2011).



Figura 2.18 – Correia transportadora depositando material fresado
Fonte: WIRTGEN (2007)

Em vias estreitas, nos grandes centros urbanos, como observa Bonfim (2007), a correia transportadora pode atrapalhar quando há a necessidade de realizar manobras com o equipamento por conta de obstáculos como postes e placas de sinalização, optando-se por desmontá-la, sendo inclusive oferecido por alguns fabricantes o sistema de dobra da correia.

2.3.3 Execução

A remoção do pavimento asfáltico deve respeitar a espessura indicada no projeto e a área demarcada previamente, sendo o material resultante depositado em unidade transportadora, conforme ilustra a Figura 2.19:

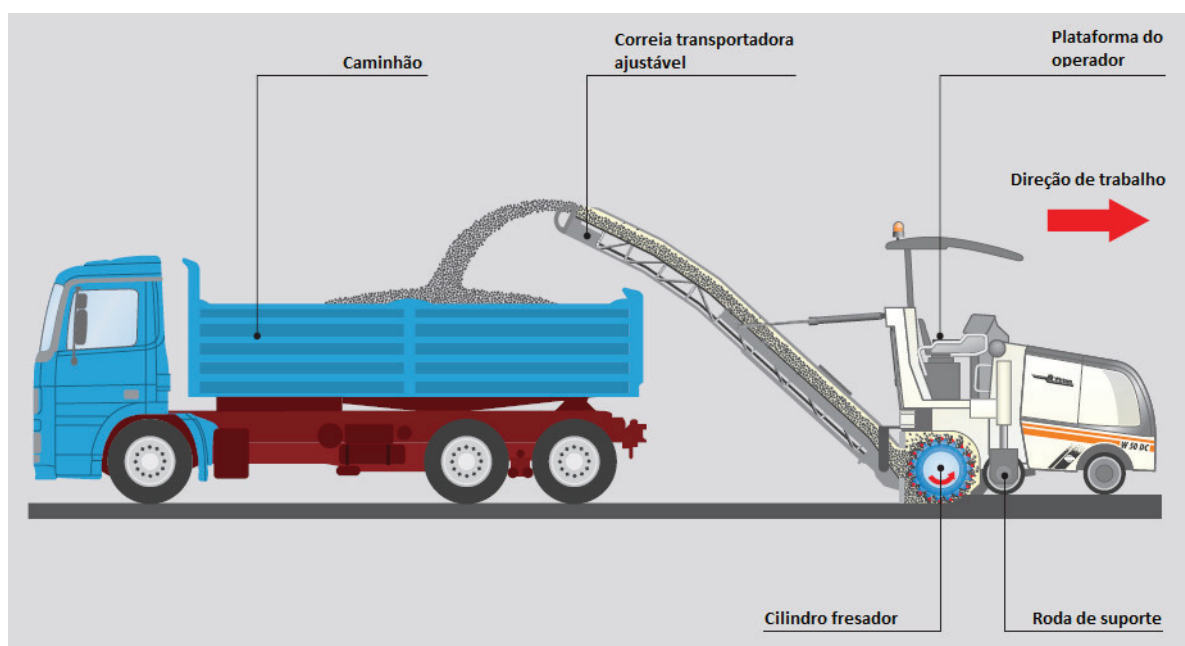


Figura 2.19 – Trem de fresagem
Fonte: adaptado de WIRTGEN (2011)

A remoção da camada deverá resultar em uma pista de superfície rugosa, porém uniforme, isto é, isenta de sulcos diferenciados e imperfeições. Deve-se atentar ao serviço que será executado para correto dimensionamento do equipamento, atendendo-se restrições quanto a uma largura mínima ou máxima do cilindro fresador, a capacidade de corte em uma única passada, o espaçamento entre dentes de corte, para casos de fresagem normal, fresagem fina ou microfresagem, (BONFIM, 2007).

As espessuras de fresagem devem obedecer às determinações de projeto, controlando-se a profundidade executada. Já quanto à rugosidade, Bonfim (2007) ressalta também que os sulcos resultantes do corte para cada aplicação devem estar nos seguintes limites:

- **Fresagem padrão:** profundidade dos sulcos ≤ 8 mm
- **Fresagem fina:** profundidade dos sulcos ≤ 5 mm
- **Microfresagem:** profundidade dos sulcos ≤ 3 mm

Para obter resultados satisfatórios devem-se seguir alguns cuidados quanto às restrições de serviço. Entre elas, Bonfim (2007) ressalta que a liberação do tráfego, ainda que possa ser efetuada após o término do serviço, deve ser evitada até que seja efetuada a recomposição do revestimento, para que não haja sobrecarga momentânea da estrutura.

Somado a esse fator há uma sorte de interferências presentes do meio urbano que devem ser levadas em consideração, sendo estas:

- **Características geométricas:**
 - a) Largura da via;
 - b) Extensão de execução, a qual gera dificuldades logísticas na fresagem de longos panos devido à presença de sarjetões nas intersecções;
 - c) Incompatibilidade entre a espessura fresada e recomposta, podendo causar uma saliência (degrau) entre o pavimento e o meio fio;
- **Interferências dos dispositivos das empresas concessionárias:** poços de visitas (PV), laço ou *loop* para controle de posicionamento para acionamento de radares, etc.;

- **Sinalização horizontal:** remoção de faixas de sinalização e presença de lombadas.

Essas questões podem ser contornadas devido à ampla gama de fresadoras disponíveis no mercado, atenuando-se os impasses de interferências com o uso do equipamento apropriado para cada situação.

Os equipamentos atuais possuem grande versatilidade para execução de serviços em áreas restritas ou de difícil acesso, típicas do meio urbano, (Figura 2.20 e 2.21).



Figura 2.20 – Fresadora W 100 F, da Wirtgen, fresando uma via estreita.
Fonte: WIRTGEN (2011)



Figura 2.21 – Fresadora W 350 E, da Wirtgen
Fonte: WIRTGEN (2011)

2.4 Manutenção de pavimentos

O maior objetivo do pavimento é atender de maneira satisfatória as suas funções básicas de segurança, economia e conforto ao rolamento, sendo concebido, projetado, construído e conservado de forma a preservar níveis de serventia compatíveis e homogêneos em toda a sua extensão.

Porém, como relembra Nakahara (2005), os pavimentos não são concebidos para durar eternamente, mas sim para um determinado período de tempo. Durante este ciclo, o pavimento inicia a sua vida em uma condição perfeita, até alcançar uma condição ruim. O decréscimo da condição ou da serventia do pavimento ao longo do tempo é conhecido como deterioração do pavimento, (DNIT, 2006).

Compreender os mecanismos que regem o processo de deterioração é condição essencial para identificar as causas que o levaram a sua condição atual, tendo em vista que esses fatores influenciam diretamente na escolha e programação da técnica mais adequada de recuperação ou restauração.

Por fim, para entender o desempenho dos pavimentos asfálticos é importante ressaltar as causas de sua deterioração, que de maneira geral consistem em (NAKAHARA, 2005):

- Formação e crescimento de fissuras nas camadas de revestimento, decorrentes da fadiga provocada pela repetição das cargas de tráfego;
- Geração de afundamentos em trilha de roda ou ondulações na superfície em decorrência do acúmulo de deformações plásticas em todas as camadas, sob a repetição das cargas de tráfego;
- Desgaste em decorrência da abrasão provocada pelos veículos, acelerado pelo intemperismo, levando à queda do coeficiente de atrito;
- Envelhecimento do ligante betuminoso por oxidação.

A autora Nakahara (2005) observa também que o mecanismo de degradação dominante nas rodovias de tráfego médio ou pesado é o trincamento por fadiga e, nas vias urbanas, os afundamentos plásticos devido ao subdimensionamento ou a falhas na

compactação. Porém pode-se aceitar que a degradação por fadiga também é presente dentro do perímetro urbano, devido à alta solicitação de avenidas e acessos.

Neste sentido, a manutenção de pavimentos pode ser definida como o conjunto de operações desenvolvidas para manter ou elevar o nível de desempenho de uma via, garantindo segurança, conforto e economia, a qual contempla não só o pavimento asfáltico como também seus componentes (pavimento, terraplenagem, dispositivos de drenagem, obras-de-arte, etc.).

Manter o desempenho é também levar em consideração a importância do transporte no complexo da atividade socioeconômica, dentro de uma perspectiva de longo prazo (NAKAHARA, 2005), tratando de maneira preventiva as patologias decorrentes da estrutura flexível.

Segundo o DNIT (2006), a manutenção de pavimentos surgiu em função da crise do petróleo nos anos 70, da extinção do FRN (Fundo Rodoviário Nacional) nos anos 80 e dos progressivos cortes de investimento na área da expansão rodoviária, o que culminou com o aumento da fragilidade do setor.

Este fenômeno auxiliou a procura por alternativas de manutenção e recuperação das vias, uma vez que a idade dos pavimentos bem como a solicitação intensa do tráfego já havia superado a vida útil dos projetos originais.

2.4.1 DNER-PRO 269/94

Para a determinação da espessura de reforço de estruturas de pavimento flexível utiliza-se o procedimento DNER-PRO 269/94 – Projeto de restauração de pavimentos flexíveis – TECNAPAV. O método surgiu da necessidade de se analisar uma nova alternativa aos métodos usuais, uma vez que as características resilientes dos solos e materiais que rotineiramente constituem as estruturas de pavimento no Brasil influenciam diretamente no comportamento mecânico destes.

Segundo o DNER (1994), o procedimento é fundamentado em modelos de fadiga de misturas betuminosas, no comportamento resiliente típico de solos finos e materiais granulares e no cálculo de tensões e deformações considerando a teoria da elasticidade não linear.

O método consiste inicialmente na classificação das vias candidatas a intervenção. Esta é fragmentada em segmentos homogêneos, que apresentam as mesmas características quanto às condições de tráfego, subleito, deflexões recuperáveis, estrutura do pavimento e condições superficiais. Para a caracterização do subleito efetua-se também a sondagem dos trechos, para a determinação de ensaios de caracterização, granulometria e CBR.

Dentro do ensaio de granulometria o valor de maior influencia é a percentagem de silte, que é obtida através do cálculo da expressão (DNER, 1994):

$$S = 100 - \frac{P1}{P2} \times 100$$

Onde:

S = Silte, em %;

P1 = percentagem, em peso, de partículas de diâmetro inferior a 0,005 mm;

P2 = percentagem, em peso, de partículas de diâmetro inferior a 0,075 mm.

Com o valor obtido, os solos então são classificados em três grupos quanto a sua resiliência, em função de seu CBR e de sua porcentagem de silte (S).

Quadro 2.1 – Classificação dos solos

| CBR % | S % | | |
|-------|------|---------|------|
| | ≤ 35 | 35 a 65 | > 65 |
| ≥ 10 | I | II | III |
| 6 a 9 | II | II | III |
| 2 a 5 | III | III | III |

Fonte: DNER (1994)

Com a classificação dos solos identificam-se os valores para as constantes I1 e I2, que estão relacionadas com características resilientes da 3ª camada da estrutura de referência. A obtenção desses valores se dá com pelos seguintes parâmetros:

- **Caso 1** – espessura da camada granular inferior ou igual a 45 cm
 - Quando a 3ª camada for do tipo I: I1 = 0 e I2 = 0
 - Quando a 3ª camada for do tipo II: I1 = 1 e I2 = 0
 - Quando a 3ª camada for do tipo III: I1 = 0 e I2 = 1

- **Caso 2** – espessura da camada granular é maior que 45 cm

– Adotar $\rightarrow I_1 = 0$ e $I_2 = 1$

A determinação da espessura de corte e de reforço, quando aplicáveis, é obtida após a identificação da espessura de mistura betuminosa existente (h_e), da deflexão característica (D_c)¹, da espessura da camada granular (H_{cg}) e do tipo de solo da fundação, (Figura 2.22).



Figura 2.22 – Estrutura de referencia do TECNAPAV

Fonte: DNIT (2006)

Tendo em vista os parâmetros acima mencionados, obtém-se em primeira instância o módulo de resiliência efetivo, valor representativo da situação da estrutura frente à deflexão de projeto atuante e o tipo de solo de fundação. É obtido através da fórmula:

$$\log M_{ef} = 11,19 - 2,753 \log D_c - 1,714 \log h_e - 0,0053 I_1 + 0,2766 I_2 \quad (1)$$

Onde:

D_c = deflexão de projeto, 0,01 mm;

I_1, I_2 = constantes relacionadas às características da camada de fundação;

h_e = espessura da camada betuminosa existente, cm;

M_{ef} = módulo de resiliência efetivo do revestimento existente, kgf/cm².

Com o módulo efetivo, compara-se seu valor com o módulo de resiliência do revestimento betuminoso novo, com o objetivo de avaliar a situação do existente. O valor, conhecido como relação modular, é obtido através da expressão:

¹ $D_c = x + \sigma$

Onde: D_c = deflexão característica;

x = leitura de deflexão;

$$\mu = \frac{MR_c}{M_{ef}} \quad (2)$$

Onde:

μ = relação modular;

MR_c = módulo de resiliência do revestimento betuminoso novo, kgf/cm².

Adotam-se diferentes valores para a espessura de corte (hc), adotando a restrição de que $hc \geq 3,0\text{cm}$ e $hc \leq h_e - 2,0\text{cm}$, para que se possa calcular a deflexão de projeto característica após fresagem, valor que indica a eficácia do corte sobre a deflexão de projeto medida. Obtém-se esse valor através da expressão:

$$\overline{Dc} = Dc \left[\frac{hc}{he} \left(\mu^{\frac{1}{3}} - 1 \right) + 1 \right]^{-1,324} \quad (3)$$

Através da deflexão de projeto característica após fresagem, calcula-se a espessura efetiva do revestimento, através da equação:

$$h_{ef} = -5,737 + \frac{807,961}{D_c} + 0,972 I_1 + 4,101 I_2 \quad (4)$$

Onde:

h_{ef} = espessura de mistura betuminosa efetiva (cm);

D_c = deflexão característica (0,01 mm).

As soluções de recuperação se baseiam na comparação entre a deflexão característica após fresagem e a deflexão máxima permissível, calculada através da fórmula:

$$\log \overline{D} = 3,148 - 0,188 \log Np \quad (5)$$

Onde:

D = deflexão máxima permissível (0,01mm);

Np = número de solicitações de eixo padrão de 8,2 t, durante a vida do projeto.

Quando a deflexão máxima for superior à deflexão característica de projeto, deve-se calcular também a espessura de reforço em concreto asfáltico (HR), a qual irá suprir a condição estrutural remanescente para atingir uma condição aceitável. A espessura de reforço é obtida pela equação:

$$HR = -19,015 + \frac{238,14}{D^{1/2}} - 1,357h_{ef} + 1,014I_1 + 3,893I_2 \quad (6)$$

Os casos onde $\mu \leq 1,00$ (caso 1) conclui-se que o módulo de resiliência efetivo é superior ao do revestimento novo, evidenciando que a estrutura ainda não teve grande perda estrutural, mas sim desgaste superficial. A deflexão aparece como problema superficial secundário, na forma de irregularidades como trilha de roda e pequenos afundamentos. Nesses casos o problema envolvido é de esfera funcional, não sendo contemplada pela norma a previsão de aplicação de fresagem.

Porém, ainda que dentro das especificações o corte mínimo seja fixado em 3,0 cm, já há a tecnologia para corte de espessuras inferiores. Assim, a melhor solução de intervenção reside na execução de fresagem fina com posterior aplicação de lama asfáltica, tratamento superficial ou microrrevestimento para diminuição da deflexão de projeto e melhora funcional da estrutura, bem como para o selamento de trincas e o rejuvenescimento do ligante asfáltico.

Para o caso onde $\mu > 1$ e $\overline{D_c} < \overline{D}$ (caso 2.1), obtêm-se de maneira direta uma diminuição da deflexão após fresagem em relação à deflexão máxima admissível, o que representa um ganho estrutural. Em determinados casos há não só a fresagem e recomposição do corte, mas também a aplicação de reforço asfáltico (HR) para que a estrutura apresente deflexão compatível.

A solução simplificada está na execução de fresagem rasa ou profunda, de acordo com a espessura, dando-se preferência à espessura de corte que evite a aplicação de reforço complementar. O reforço só é aplicável quando o greide da via permitir, sendo necessária a avaliação de dispositivos de drenagem e possíveis interferências.

Para o caso onde $\mu > 1$ e $\overline{D_c} > \overline{D}$ (caso 2.2), a solução deve ser integrada para obter deflexão que se aproxime a máxima admissível, adotando solução de recomposição da espessura de fresagem e reforço (HR). Para espessuras compreendidas entre $12,5 < HR \leq 25,0$ cm deve-se dividir a execução em CAUQ (H_{CAUQ}) e pré-misturado (H_{pm}), na relação de:

$$H_{pm} = 0,60 HR$$

$$H_{CAUQ} = HR - H_{pm}$$

Pode-se optar também pela utilização de revestimentos asfálticos de alto módulo de resiliência, porém essas soluções devem ser avaliadas criteriosamente, devido o custo

elevado de misturas especiais e a dificuldade de usinagem pela baixa escala de produção. Ressalta-se também que revestimentos de alto módulo estão mais sujeitas a ruptura por fadiga.

O modelo resumido de soluções quanto à relação modular, deflexão efetiva e respectivas espessuras pode ser consultado na Tabela 2.1. Pontuam-se as diversas soluções para cada caso em particular

Tabela 2.1 – Decisões quanto ao tipo de fresagem e recomposição de pavimento

| μ | \overline{Dc} | ESPESSURAS | DECISÕES INERENTES AO REAPROVEITAMENTO DO PAVIMENTO, TIPO DE FRESAGEM E ALTERNATIVA DE RECOMPOSIÇÃO |
|--------------|--|----------------------------------|--|
| $\mu \leq 1$ | $\overline{Dc} \leq \overline{\overline{D}}$ ou $HR \leq 3,0 \text{ cm}$ | - | 1. Aproveitamento total do pavimento 2. Execução de fresagem fina 3. Aplicação de lama asfáltica ou microrrevestimento a frio |
| $\mu > 1$ | $\overline{Dc} \leq \overline{\overline{D}}$ | $hc \leq 5,0 \text{ cm}$ | 1. Aproveitamento parcial do pavimento 2. Execução de fresagem rasa (hc) 3. Recomposição de capa com CAUQ (hc) |
| | | $hc > 5,0 \text{ cm}$ | 1. Aproveitamento parcial do pavimento 2. Execução de fresagem profunda (hc) 3. Recomposição de capa com CAUQ (hc) |
| | $\overline{Dc} \geq \overline{\overline{D}}$ | $HR \leq 12,5 \text{ cm}$ | 1. Aproveitamento parcial do pavimento 2. Execução de fresagem profunda (hc) 3. Recomposição de capa com CAUQ (hc) 4. Aplicação de reforço com CAUQ (HR) |
| | | $12,5 < HR \leq 25,0 \text{ cm}$ | 1. Aproveitamento parcial do pavimento 2. Execução de fresagem profunda (hc) 3. Recomposição de capa com CAUQ (hc) 4. Aplicação de reforço misto, sendo 0,60HR em CAUQ e 0,40HR em PM |

Fonte: adaptado de DNER (1994)

2.4.2 Análise mecanicista

Complementar aos métodos de dimensionamento de estruturas novas e de camadas de reforço, as análises mecanicistas tem por objetivo verificar a condição estrutural de pavimentos pré-dimensionados, (PMSP, 2004). Entre os diversos métodos empregados está a Instrução de Projeto (IP) 08 – Análise Mecanicista à Fadiga de Estruturas de Pavimento.

A IP-08 reúne métodos de cálculo e recomendações para a verificação estrutural de pavimentos dimensionados pelos métodos da PMSP, uma vez que os procedimentos tradicionais e normatizados para o dimensionamento de pavimentos asfálticos flexíveis e

semirrígidos não avaliam a ocorrência de fatores complementares ao comportamento da estrutura, devendo ser avaliada mais profundamente a interação entre camadas.

Esta implica na ponderação de diversos fatores, (PMSP, 2004):

- Verificação de deformações e de tensões em estruturas de pavimento asfáltico, por meio do emprego da Teoria Elástica de Sistemas de Camadas, proposta por Burmister na década de 1940;
- Seleção de modelos experimentais ou semi empíricos descrevendo o comportamento à fadiga de dado material em função do número de solicitações de carga que causa determinado nível de deformação ou de tensão no material;
- Avaliação das diferenças entre processos mecânicos de degradação em pista comparados aos processos experimentais em laboratório, levando em consideração a variabilidade dos módulos de elasticidade dos materiais em função de fatores diversos (clima, posição da faixa de rolamento, pressões pneumáticas, etc.);
- Avaliação da tolerância à fadiga dos materiais e camadas da estrutura.

Tendo esses valores em questão, procede-se a avaliação do comportamento da estrutura, objetivando atenuar as tensões na camada sujeito ao fenômeno de fadiga, que corresponde à zona de solicitação mais crítica da estrutura.

CAPÍTULO 3

3 ESTUDO DE CASO

Através do Capítulo 2 concebeu-se uma noção geral sobre a deflexão de pavimentos flexíveis e como esta influencia diretamente no comportamento estrutural. A deflexão é responsável pelo fenômeno de fadiga e consequente aparição de trincas, que provocam a perda de valor estrutural do conjunto. Tendo em vista tal constatação e através da gerencia de manutenção de pavimentos, procedeu-se a avaliação da eficácia do método de fresagem asfáltica nas estruturas de pavimento urbano, através de modelo teórico concebido pelo DNER.

3.1 Estruturas analisadas

Os perfis de pavimento para avaliação estrutural foram obtidos através de modelos fechados das Instruções de Projeto da PMSP, os quais condizem com as estruturas usualmente dimensionadas para tráfego urbano. Essas estruturas podem ser consultadas nas normas IP 04 – Instrução para Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis para Tráfego Leve e Médio e IP 05 – Instrução para Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis para Tráfego Meio Pesado, Pesado, Muito Pesado e Faixa Exclusiva de Ônibus.

Assim, obteve-se um modelo representativo para cada tipo de tráfego. Quanto ao material de subleito, dividiram-se as estruturas quanto ao tipo de solo do subleito, em tipo I, II ou III, conforme procedimento mencionado no item 2.4.1 DNER-PRO 269/94. Essa divisão foi possível pelo fato de todas as estruturas atenderem o limite máximo 45 cm de espessura para a camada granular.

As deflexões atuantes (D_c) foram dispostas no intervalo de 80 a 150, o que ofereceu a uma matriz de análise com 8 combinações por tráfego e tipos de solo, 24 por tipo de tráfego, totalizando 120 combinações possíveis.

Tendo os valores fixados, a análise gerou um valor de deflexão máxima ($\overline{\overline{D}}$) permissível para cada tráfego, valor representativo da pior condição a qual a estrutura pode suportar sem que haja comprometimento das camadas inferiores.

Com a adoção de valores para a espessura de fresagem (h_c), pode-se calcular o valor de $\overline{D_c}$ após fresagem, valor que deve apresentar-se inferior ao máximo calculado.

A avaliação das estruturas foi realizada através do cálculo da espessura de revestimento efetiva (hef), referente à capacidade estrutural do revestimento existente antes da fresagem. Esse parâmetro nos indica o momento em que será necessária a realização de alguma intervenção, no caso da fresagem asfáltica, a qual possibilitara a renovação da capa asfáltica.

O módulo de resiliência do CAUQ foi fixado em 30.000 kgf/cm², limite inferior especificado pelos parâmetros da PMSP.

3.1.1 Tráfego leve

De acordo com a IP-02 – Classificação das Vias (PMSP, 2004), as vias de tráfego leve compreendem ruas de trânsito essencialmente residencial, composto por veículos leves de trânsito local. Para o Código de Trânsito Brasileiro (CTB) (2008), define-se por via local como aquela destinada apenas ao acesso local ou a áreas restritas. Não está prevista a circulação de ônibus ou caminhões, sendo tolerada a passagem de até 20 veículos pesados por dia, por faixa de tráfego.

A estrutura de tráfego leve, consultada através da IP 04 da PMSP, foi dimensionada para um tráfego de número N característico de $1,00 \times 10^5$ solicitações para um período estipulado de vida de projeto de 10 anos.

Os principais dados de projeto para vias de tráfego leve podem ser consultados no Quadro 3.1:

Quadro 3.1 – Classificação das Vias – Tráfego Leve

| <i>FUNÇÃO PREDOMINANTE</i> | <i>TRÁFEGO PREVISTO</i> | <i>VIDA DE PROJETO (ANOS)</i> | <i>VOLUME INICIAL DA FAIXA MAIS CARREGADA</i> | | <i>N</i> | <i>N característico</i> |
|---|-----------------------------|---------------------------------------|---|-------------------------------|---|-------------------------|
| | | | <i>VEÍCULO LEVE</i> | <i>CAMINHÕES E ÔNIBUS</i> | | |
| Via Local Residencial C/ Passagem | Leve | 10 | 100 a 400 | 4 a 20 | $2,7 \times 10^4$ a $1,4 \times 10^5$ | 10^5 |

Fonte: PMSP (2004)

Entre as estruturas pré-dimensionadas sugeridas pela IP, utilizou-se a estrutura representada pela Figura 3.1. Optou-se por essa estrutura por ser revestida com CAUQ, material de aplicação mais difundida para revestimento. Outro fator determinante foi o conhecimento do CBR do subleito, garantindo assim uma estrutura com composição granular conhecida.

| | |
|--|---------|
| CAUQ | 3,5 cm |
| Imprimação ligante | |
| Macadame betuminoso | 5,0 cm |
| Imprimação impermeabilizante | |
| Macadame hidráulico | 10,0 cm |
| Subleito compactado a 100% da energia normal CBR $\geq 11\%$ | 15,0 cm |

Figura 3.1 – Estrutura 1: Tráfego leve
Fonte: adaptado de PMSP (2004)

A avaliação, conforme procedimento apresentado no item 2.4.1, iniciou-se pelo cálculo do módulo de resiliência efetivo, valor de referencia para a análise das condições atuais da estrutura pavimento. Como apresentado na equação 1, o módulo de resiliência da estrutura existente analisa as condições quanto à deflexão medida em campo, bem como as peculiaridades do tipo de solo de fundação, classificado em tipo I, II ou III.

O valor obtido auxilia a análise da condição existente com a esperada através do valor do módulo efetivo (equação 2), sendo adotado um módulo de resiliência de 30.000 kgf/cm² para mistura nova de CAUQ. Os valores obtidos são expressos pela Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Espessuras de reforço para tráfego leve

| ESTRUTURA | 1.1 | 1.2 | 1.3 | 1.4 | 1.5 | 1.6 | 1.7 | 1.8 |
|-------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Dc | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 | 130 | 140 | 150 |
| Mef | Tipo I | 104.294 | 75.412 | 56.424 | 43.402 | 34.157 | 27.402 | 22.345 |
| | Tipo II | 103.029 | 74.497 | 55.740 | 42.876 | 33.743 | 27.070 | 22.074 |
| | Tipo III | 197.179 | 142.573 | 106.676 | 82.057 | 64.578 | 51.806 | 42.245 |
| μ | Tipo I | 0,29 | 0,40 | 0,53 | 0,69 | 0,88 | 1,09 | 1,62 |
| | Tipo II | 0,29 | 0,40 | 0,54 | 0,70 | 0,89 | 1,11 | 1,64 |
| | Tipo III | 0,15 | 0,21 | 0,28 | 0,37 | 0,46 | 0,58 | 0,86 |
| Hc | Tipo I | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | Tipo II | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | Tipo III | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| hef | Tipo I | 4,4 | 3,2 | 2,3 | 1,6 | 1,0 | 0,5 | 0,0 |
| | Tipo II | 5,3 | 4,2 | 3,3 | 2,6 | 2,0 | 1,5 | 0,6 |
| | Tipo III | 8,5 | 7,3 | 6,4 | 5,7 | 5,1 | 4,6 | 3,8 |
| HR | Tipo I | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | Tipo II | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | Tipo III | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |

Fonte: PRÓPRIA (2012)

O módulo efetivo apresentou-se elevado em 20 estruturas do conjunto (Gráfico 3.1), atendendo uma condição satisfatória, o que indica que o tráfego atuante não alterou significativamente a integridade estrutural sob tais deflexões. Assim, para esses casos, não há previsão para a aplicação de medidas corretivas, uma vez que a estrutura do pavimento ainda encontra-se satisfatória.

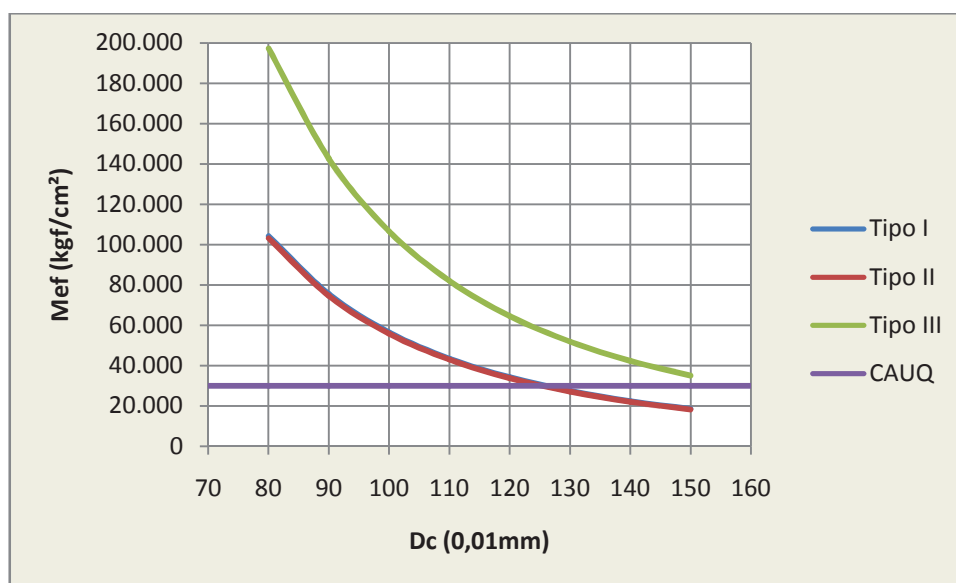


Gráfico 3.1 – Módulo de resiliência efetivo x Deflexão de projeto – Tráfego leve
Fonte: PRÓPRIA (2012)

Nas estruturas 1.7 e 1.8 (Tabela 3.1 e Gráfico 3.1), para o tipo II e III, houve decréscimo da resiliência, porém a norma não prevê ações corretivas de fresagem, uma vez que se restringe a remoção de capa apenas em casos em que esta não seja inferior que $h_c - 2,0$ cm, onde a espessura de corte tem que ser de no mínimo 3,0 cm. Esse fenômeno ocorre devido à impossibilidade de se expor as camadas inferiores ao corte, o que geraria outros defeitos pela desagregação do material granular da camada inferior.

Contudo, como exposto no item 2.3, sabe-se que hoje há a possibilidade da realização de fresagem em espessuras inferiores, sendo indicado para casos dessa natureza à execução de fresagem fina, com espessura de 8 mm, combinada com a aplicação de lama asfáltica ou microrrevestimento, sendo o segundo mais aconselhável por possuir maior valor estrutural.

3.1.2 Tráfego médio

As vias de tráfego médio são classificadas como vias coletoras secundárias, que, segundo o CTB (2008), são compostas por ruas, avenidas ou caminhos e similares abertos à circulação, coletando de forma secundária o tráfego das vias principais. Estruturalmente permitem a passagem de caminhões e ônibus na ordem de 21 a 100 por dia, por faixa de tráfego, (PMSP, 2004).

A estrutura de tráfego médio, consultada através da IP 04 da PMSP, foi dimensionada para um tráfego de número N característico de $5,00 \times 10^5$ solicitações para um período estipulado de vida de projeto de 10 anos.

Os principais dados de projeto podem ser consultados pelo Quadro 3.2:

Quadro 3.2 – Classificação das Vias – Tráfego Médio

| <i>FUNÇÃO PREDOMINANTE</i> | <i>TRÁFEGO PREVISTO</i> | <i>VIDA DE PROJETO (ANOS)</i> | <i>VOLUME INICIAL DA FAIXA MAIS CARREGADA</i> | | <i>N</i> | <i>N característico</i> |
|---------------------------------------|------------------------------------|--|--|--------------------------------------|---|--------------------------------|
| | | | <i>VEÍCULO LEVE</i> | <i>CAMINHÕES E ÔNIBUS</i> | | |
| Via Coletora Secundária | Médio | 10 | 401 a 1500 | 21 a 100 | $1,4 \times 10^5$ a $6,8 \times 10^5$ | 5×10^5 |

Fonte: PMSP (2004)

A estrutura escolhida para a verificação está representada pela Figura 3.2, que ilustra uma seção convencional de execução no perímetro urbano.

| | |
|--|---------|
| CAUQ | 5,0 cm |
| Imprimação ligante | |
| Binder | 4,0 cm |
| Imprimação impermeabilizante | |
| BGS | 10,0 cm |
| Subleito compactado a 100% da energia normal CBR $\geq 19\%$ | 15,0 cm |

Figura 3.2 – Estrutura 2: Tráfego médio

Fonte: PMSP (2004)

Dada à estrutura e as condições do tráfego, foi calculado o valor do módulo de resiliência efetivo, conforme ilustra a Tabela 3.2:

Tabela 3.2 – Espessuras de reforço para tráfego médio

| ESTRUTURA | | 2.1 | 2.2 | 2.3 | 2.4 | 2.5 | 2.6 | 2.7 | 2.8 |
|-----------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
| Dc | | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 | 130 | 140 | 150 |
| Mef | Tipo I | 20.664 | 14.942 | 11.180 | 8.600 | 6.768 | 5.429 | 4.427 | 3.661 |
| | Tipo II | 20.414 | 14.760 | 11.044 | 8.495 | 6.686 | 5.363 | 4.374 | 3.617 |
| | Tipo III | 39.068 | 28.249 | 21.136 | 16.258 | 12.795 | 10.265 | 8.370 | 6.922 |
| μ | Tipo I | 1,45 | 2,01 | 2,68 | 3,49 | 4,43 | 5,53 | 6,78 | 8,19 |
| | Tipo II | 1,47 | 2,03 | 2,72 | 3,53 | 4,49 | 5,59 | 6,86 | 8,29 |
| | Tipo III | 0,77 | 1,06 | 1,42 | 1,85 | 2,34 | 2,92 | 3,58 | 4,33 |
| Hc | Tipo I | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 |
| | Tipo II | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 |
| | Tipo III | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 |
| \overline{Dc} | Tipo I | 75,6 | 80,6 | 85,1 | 89,1 | 92,8 | 96,1 | 99,2 | 101,9 |
| | Tipo II | 75,4 | 80,4 | 84,9 | 88,9 | 92,6 | 95,9 | 98,9 | 101,7 |
| | Tipo III | 83,1 | 89,2 | 94,8 | 99,9 | 104,6 | 108,9 | 112,9 | 116,5 |
| hef | Tipo I | 5,0 | 4,3 | 3,8 | 3,3 | 3,0 | 2,7 | 2,4 | 2,2 |
| | Tipo II | 5,9 | 5,3 | 4,8 | 4,3 | 4,0 | 3,7 | 3,4 | 3,2 |
| | Tipo III | 8,1 | 7,4 | 6,9 | 6,5 | 6,1 | 5,8 | 5,5 | 5,3 |
| HR | Tipo I | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | Tipo II | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | Tipo III | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |

Fonte: PRÓPRIA (2012)

Pelo cálculo de M_{ef} , pode-se observar que os valores obtidos, exceto estrutura 2.1 tipo III, não atendem o valor especificado, sendo recomendada a execução de fresagem asfáltica, (Gráfico 3.2).

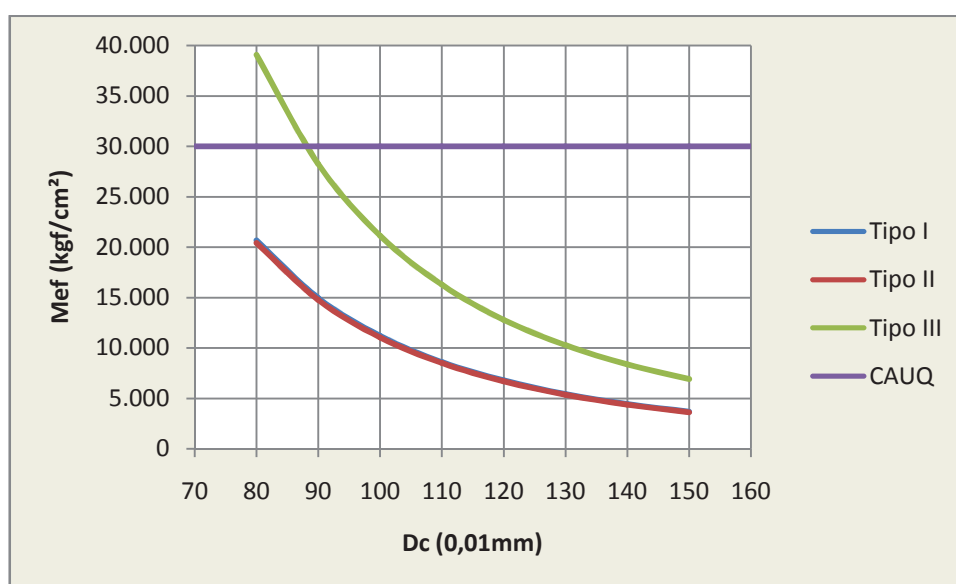


Gráfico 3.2 – Módulo de resiliência efetivo x Deflexão de projeto – Tráfego médio
Fonte: PRÓPRIA (2012)

Para os demais casos, orienta-se a espessura de corte (h_c), simulada através dos parâmetros para a execução do corte, o qual em todos os casos foi de 3,0 cm.

Com o valor de coeficiente modular, efetuou-se o cálculo da deflexão característica após fresagem ($\overline{D_c}$) (equação 3), também apresentado na Tabela 3.2. Esses valores serviram de base para comparação com a deflexão máxima de projeto ($\overline{\overline{D}}$) (equação 5), que para essa estrutura foi calculada em $119,29 \times 10^{-2}$ mm, (Gráfico 3.3).

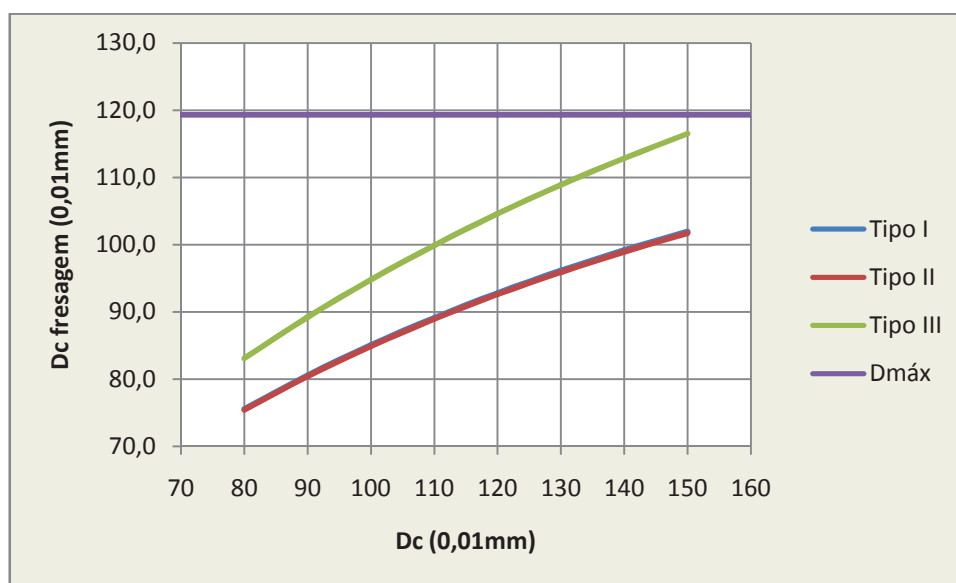


Gráfico 3.3 – Deflexão após fresagem x Deflexão de projeto – Tráfego médio
Fonte: PRÓPRIA (2012)

Como se observa, os valores de deflexão diminuíram sensivelmente após o corte, trazendo ganho estrutural justificável para a fresagem e posterior recomposição de capa, onde os pavimentos com solo de fundação tipo I e tipo II apresentaram comportamentos semelhantes, enquanto o tipo III apresentou deflexão superior à média.

Outro valor de referencia é o valor da espessura efetiva (h_{ef}) (equação 4), que orienta a execução de espessura de reforço (HR) (equação 5). Para as estruturas em questão não foi constatada a necessidade de reforço da estrutura, sendo necessário apenas a fresagem e recape na espessura h_c .

3.1.3 Tráfego meio pesado

As vias de tráfego meio pesado são compostas por vias coletoras principais, para ruas ou avenidas onde é prevista a passagem de caminhões e ônibus na ordem de 101 a 300 por dia, por faixa de tráfego (PMSP, 2004).

A estrutura de tráfego meio pesado, consultada através da IP 05 da PMSP, foi dimensionada para um tráfego de número N característico de $2,00 \times 10^6$ solicitações para um período estipulado de vida de projeto de 10 anos.

Os principais dados de projeto podem ser consultados pelo Quadro 3.3:

Quadro 3.3 – Classificação das Vias – Tráfego Meio Pesado

| <i>FUNÇÃO PREDOMINANTE</i> | <i>TRÁFEGO PREVISTO</i> | <i>VIDA DE PROJETO (ANOS)</i> | <i>VOLUME INICIAL DA FAIXA MAIS CARREGADA</i> | | <i>EQUIVALENTE POR VEÍCULO COMERCIAL</i> | <i>N</i> | <i>N característico</i> |
|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|---|-------------------------------|--|---|-----------------------------|
| | | | <i>VEÍCULO LEVE</i> | <i>CAMINHÕES E ÔNIBUS</i> | | | |
| Via Coletadora Principal | Meio Pesado | 10 | 1.501 a 5.000 | 101 a 300 | 2,30 | $1,4 \times 10^6$ a $3,1 \times 10^6$ | 2×10^6 |

Fonte: PMSP (2004)

A estrutura de projeto para tráfego meio pesado é representada pela Figura 3.3, sendo esta uma estrutura de pavimento semirrígido, pois sua camada de base é de BGTC, material com propriedades cimentantes, como exposto no item 2.1.

| | |
|---|---------|
| CAUQ | 5,0 cm |
| Imprimação ligante | |
| Binder | 5,0 cm |
| Imprimação impermeabilizante | |
| BGTC | 15,0 cm |
| BGS | 10,0 cm |
| Subleito compactado 100% PN CBR $\geq 8\%$ | 15,0 cm |

Figura 3.3 – Estrutura 3: Tráfego meio pesado
Fonte: PMSP (2004)

Dada à estrutura supracitada e as condições do tráfego bem como de deflexão de projeto, foram calculados os valores de módulo de resiliência efetivo, conforme ilustra a Tabela 3.3:

Tabela 3.3 – Espessuras de reforço para tráfego meio pesado

| ESTRUTURA | | 3.1 | 3.2 | 3.3 | 3.4 | 3.5 | 3.6 | 3.7 | 3.8 |
|-----------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| Dc | | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 | 130 | 140 | 150 |
| Mef | Tipo I | 17.250 | 12.473 | 9.333 | 7.179 | 5.650 | 4.532 | 3.696 | 3.056 |
| | Tipo II | 17.041 | 12.322 | 9.219 | 7.092 | 5.581 | 4.477 | 3.651 | 3.019 |
| | Tipo III | 32.613 | 23.581 | 17.644 | 13.572 | 10.681 | 8.569 | 6.987 | 5.779 |
| μ | Tipo I | 1,74 | 2,41 | 3,21 | 4,18 | 5,31 | 6,62 | 8,12 | 9,82 |
| | Tipo II | 1,76 | 2,43 | 3,25 | 4,23 | 5,38 | 6,70 | 8,22 | 9,94 |
| | Tipo III | 0,92 | 1,27 | 1,70 | 2,21 | 2,81 | 3,50 | 4,29 | 5,19 |
| Hc | Tipo I | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 4,0 | 4,0 | 4,0 |
| | Tipo II | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 4,0 | 4,0 | 4,0 |
| | Tipo III | 0,0 | 0,0 | 4,0 | 5,0 | 6,0 | 6,0 | 6,0 | 7,0 |
| \overline{Dc} | Tipo I | 74,0 | 79,1 | 83,8 | 88,0 | 91,9 | 87,3 | 89,3 | 91,2 |
| | Tipo II | 73,9 | 79,0 | 83,6 | 87,8 | 91,7 | 87,0 | 89,1 | 90,9 |
| | Tipo III | 80,0 | 90,0 | 90,6 | 91,3 | 89,6 | 90,8 | 91,8 | 86,8 |
| hef | Tipo I | 5,2 | 4,5 | 3,9 | 3,4 | 3,1 | 3,5 | 3,3 | 3,1 |
| | Tipo II | 6,2 | 5,5 | 4,9 | 4,4 | 4,0 | 4,5 | 4,3 | 4,1 |
| | Tipo III | 8,5 | 7,3 | 7,3 | 7,2 | 7,4 | 7,3 | 7,2 | 7,7 |
| HR | Tipo I | 0,0 | 0,0 | 0,5 | 1,2 | 1,7 | 1,0 | 1,3 | 1,6 |
| | Tipo II | 0,0 | 0,0 | 0,2 | 0,8 | 1,3 | 0,7 | 1,0 | 1,2 |
| | Tipo III | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |

Fonte: PRÓPRIA (2012)

Pelo cálculo de M_{ef} , pode-se observar que os valores obtidos, exceto estrutura 3.1 tipo III, não atendem o valor especificado, sendo recomendada a execução de fresagem asfáltica, (Gráfico 3.4).

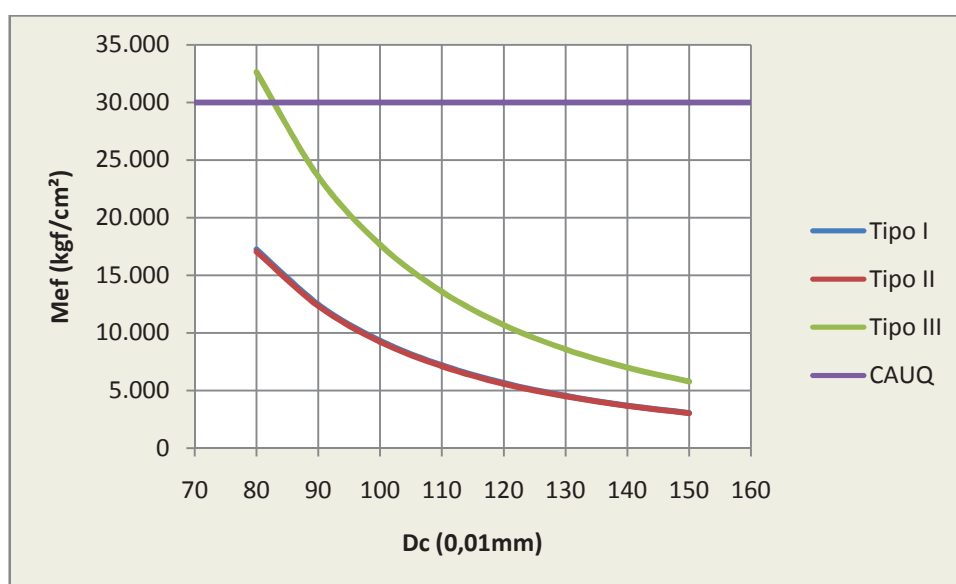


Gráfico 3.4 – Módulo de resiliência efetivo x Deflexão de projeto – Tráfego meio pesado

Fonte: PRÓPRIA (2012)

Uma vez apresentado os valores de módulo de resiliência, calculou-se diversos valores para a espessura de corte do material asfáltico, (Tabela 3.3). Nota-se que, apesar dos valores do solo tipo III terem atingido os melhores resultados quanto a suas propriedades resilientes, ainda assim apresentou uma necessidade superior de corte para atingir valores inferiores à deflexão máxima.

Através das espessuras de corte, obteve-se o valor das deflexões após fresagem, que se encontraram satisfatórios, uma vez que a máxima calculada foi de $91,92 \times 10^{-2}$ mm, (Gráfico 3.5).

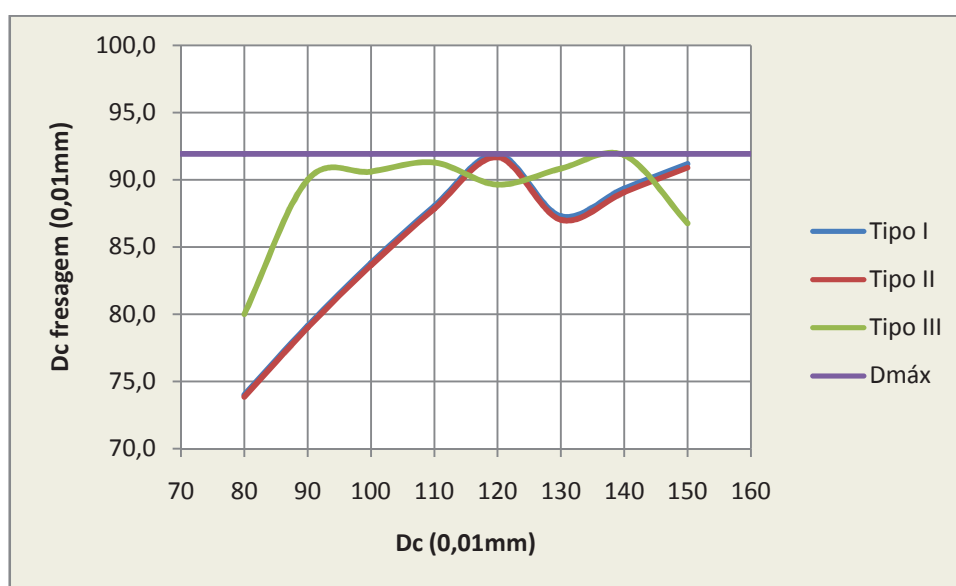


Gráfico 3.5 – Deflexão após fresagem x Deflexão de projeto – Tráfego meio pesado
Fonte: PRÓPRIA (2012)

3.1.4 Tráfego pesado

As vias de tráfego pesado são compostas por vias arteriais, as quais recebem vias secundárias e locais para o trânsito entre as regiões da cidade (CTB, 2008), sendo estas ruas ou avenidas onde é prevista a passagem de caminhões e ônibus na ordem de 301 a 1000 por dia, por faixa de tráfego (PMSP, 2004).

A estrutura de tráfego pesado, consultada através da IP 05 da PMSP, foi dimensionada para um tráfego de número N característico de $2,00 \times 10^7$ solicitações para um período estipulado de vida de projeto de 12 anos.

Os principais dados de projeto podem ser consultados pelo Quadro 3.4:

Quadro 3.4 – Classificação das Vias – Tráfego Pesado

| <i>FUNÇÃO PREDOMINANTE</i> | <i>TRÁFEGO PREVISTO</i> | <i>VIDA DE PROJETO (ANOS)</i> | <i>VOLUME INICIAL DA FAIXA MAIS CARREGADA</i> | | <i>EQUIVALENTE POR VEÍCULO COMERCIAL</i> | <i>N</i> | <i>N característico</i> |
|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|---|-------------------------------|--|---|-----------------------------|
| | | | <i>VEÍCULO LEVE</i> | <i>CAMINHÕES E ÔNIBUS</i> | | | |
| Via Arterial | Pesado | 12 | 5.001 a 10.000 | 301 a 1.000 | 5,90 | $1,0 \times 10^7$ a $3,3 \times 10^7$ | 2×10^7 |

Fonte: PMSP (2004)

A estrutura de pavimento considerada para o tráfego pesado está representada pela Figura 3.4, sendo esta uma estrutura semirrígida com base em BGTC, que lhe confere maior capacidade de suporte.

| | |
|---|---------|
| CAUQ | 5,0 cm |
| Imprimação ligante | |
| Binder | 7,5 cm |
| Imprimação impermeabilizante | |
| BGTC | 15,0 cm |
| BGS | 10,0 cm |
| Subleito compactado 100% PN CBR $\geq 8\%$ | 15,0 cm |

Figura 3.4 – Estrutura 4: Tráfego pesado

Fonte: PMSP (2004)

Dada à estrutura e as condições do tráfego, foi calculado o valor do módulo de resiliência efetivo, conforme ilustra a Tabela 3.4:

Tabela 3.4 – Espessuras de reforço para tráfego pesado

| ESTRUTURA | | 4.1 | 4.2 | 4.3 | 4.4 | 4.5 | 4.6 | 4.7 | 4.8 |
|-----------------|----------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Dc | | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 | 130 | 140 | 150 |
| Mef | Tipo I | 11.768 | 8.509 | 6.366 | 4.897 | 3.854 | 3.092 | 2.521 | 2.085 |
| | Tipo II | 11.625 | 8.406 | 6.289 | 4.838 | 3.807 | 3.054 | 2.491 | 2.060 |
| | Tipo III | 22.248 | 16.087 | 12.036 | 9.259 | 7.286 | 5.845 | 4.767 | 3.942 |
| μ | Tipo I | 2,55 | 3,53 | 4,71 | 6,13 | 7,78 | 9,70 | 11,90 | 14,39 |
| | Tipo II | 2,58 | 3,57 | 4,77 | 6,20 | 7,88 | 9,82 | 12,05 | 14,56 |
| | Tipo III | 1,35 | 1,86 | 2,49 | 3,24 | 4,12 | 5,13 | 6,29 | 7,61 |
| Hc | Tipo I | 9,0 | 9,0 | 9,0 | 9,0 | 9,0 | 9,0 | 9,0 | 9,0 |
| | Tipo II | 9,0 | 9,0 | 9,0 | 9,0 | 9,0 | 9,0 | 9,0 | 9,0 |
| | Tipo III | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 |
| \overline{Dc} | Tipo I | 58,7 | 59,0 | 59,1 | 59,2 | 59,1 | 59,0 | 58,9 | 58,7 |
| | Tipo II | 58,4 | 58,7 | 58,9 | 58,9 | 58,9 | 58,7 | 58,6 | 58,4 |
| | Tipo III | 71,9 | 71,9 | 71,8 | 71,5 | 71,3 | 70,9 | 70,6 | 70,2 |
| hef | Tipo I | 8,0 | 8,0 | 7,9 | 7,9 | 7,9 | 8,0 | 8,0 | 8,0 |
| | Tipo II | 9,1 | 9,0 | 9,0 | 9,0 | 9,0 | 9,0 | 9,0 | 9,1 |
| | Tipo III | 9,6 | 9,6 | 9,6 | 9,7 | 9,7 | 9,8 | 9,8 | 9,9 |
| HR | Tipo I | 0,9 | 1,0 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,0 | 1,0 | 0,9 |
| | Tipo II | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | 0,5 |
| | Tipo III | 2,7 | 2,7 | 2,7 | 2,6 | 2,6 | 2,5 | 2,4 | 2,3 |

Fonte: PRÓPRIA (2012)

Para as estruturas de tráfego mais solicitadas observou-se que todos os valores obtiveram resultados insatisfatórios quando a relação modular, (Gráfico 3.6). Essa situação demonstra que, para vias de tráfego pesado todas as deflexões propostas comprometeram significativamente o leito do pavimento.

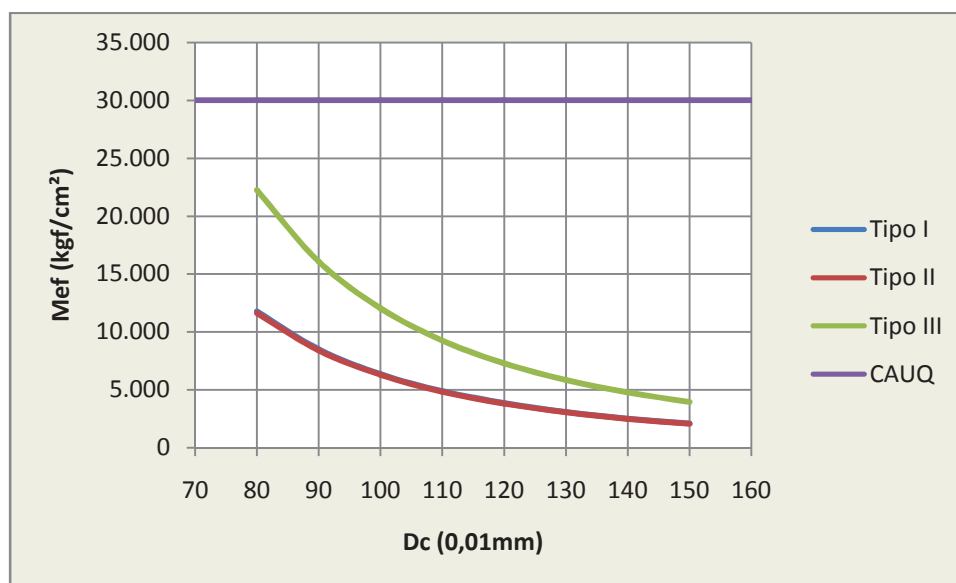


Gráfico 3.6 – Módulo de resiliência efetivo x Deflexão de projeto – Tráfego pesado

Fonte: PRÓPRIA (2012)

Por conta das baixas condições resilientes, as espessuras de corte foram fixadas em 9,0 cm para os solos de fundação tipo I e II, enquanto que para os de solo tipo III esse valor fixou-se em 10,0 cm, (Tabela 3.4). Entretanto, observa-se que ainda assim as estruturas tipo III não obtiveram resultados satisfatórios de deflexão, o que estimula a intervenção com espessuras de reforço mais espessas.

As deflexões após fresagem são apresentadas no Gráfico 3.7, comparando-se o valor de deflexão máxima, fixado em $59,62 \times 10^{-2}$ mm, em comparação com os resultados obtidos.

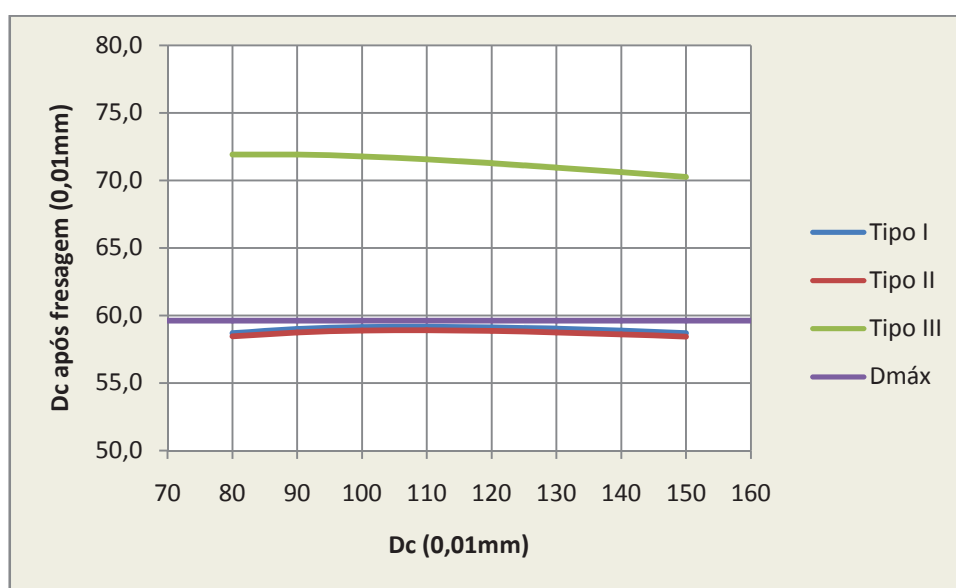


Gráfico 3.7 – Deflexão após fresagem x Deflexão de projeto – Tráfego pesado
Fonte: PRÓPRIA (2012)

Ainda que as deflexões apresentem valores elevados às espessuras efetivas do revestimento (h_{ef}) apresentaram-se próximas ao valor da estrutura existente, que possui 12,5 cm de espessura de capa. Essa condição implica que, para todos os casos, seja efetuada não só a troca de quase todo o revestimento, mas que também haja o reforço da estrutura, já que a deflexão máxima tolerável pela estrutura é bem restrita.

Para todos os casos foi considerada espessuras de reforço para atingir condições apropriadas de deflexão, (Gráfico 3.8). Para tanto, nota-se que esses valores estão diretamente relacionados com a espessura de corte.

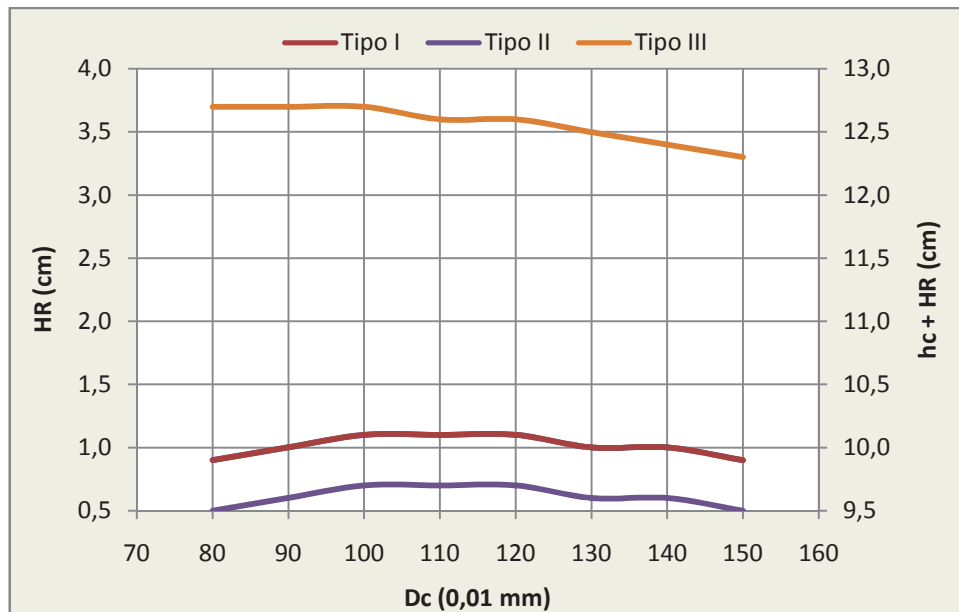


Gráfico 3.8 – Espessuras excedentes de reforço (HR) – Tráfego pesado
Fonte: PRÓPRIA (2012)

3.1.5 Tráfego muito pesado

As vias de tráfego muito pesado são compostas por vias arteriais principais ou expressas, para ruas ou avenidas onde é prevista a passagem de caminhões e ônibus na ordem de 1001 a 2000 por dia, por faixa de tráfego (PMSP, 2004).

A estrutura de tráfego muito pesado, consultada através da IP 05 da PMSP, foi dimensionada para um tráfego de número N característico de $5,00 \times 10^7$ solicitações para um período estipulado de vida de projeto de 12 anos.

Os principais dados de projeto podem ser consultados pelo Quadro 3.4:

Quadro 3.5 – Classificação das Vias – Tráfego Muito Pesado

| FUNÇÃO PREDOMINANTE | TRÁFEGO PREVISTO | VIDA DE PROJETO (ANOS) | VOLUME INICIAL DA FAIXA MAIS CARREGADA | | EQUIVALENTE POR VEÍCULO COMERCIAL | N | N característico |
|------------------------------------|------------------|------------------------|--|---------------------|-----------------------------------|---|--------------------|
| | | | VEÍCULO LEVE | CAMINHÕES E ÔNIBUS | | | |
| Via Arterial Principal ou Expressa | Muito Pesado | 12 | > 10.000 | 1.001 a 2.000 | 5,90 | $3,3 \times 10^7$ a $6,7 \times 10^7$ | 5×10^7 |

Fonte: PMSP (2004)

A estrutura considerada é apresentada na Figura 3.5:

| | |
|--|---------|
| CAUQ | 5,0 cm |
| Imprimação ligante | |
| Binder | 7,5 cm |
| Imprimação impermeabilizante | |
| BGTC | 20,0 cm |
| BGS | 10,0 cm |
| Subleito compactado 100% PN CBR \geq 8% | 15,0 cm |

Figura 3.5 – Estrutura 05: Tráfego muito pesado
Fonte: PMSP (2004)

Dada à estrutura e as condições do tráfego, foi calculado o valor do módulo de resiliência efetivo, conforme ilustra a Tabela 3.5:

Tabela 3.5 – Espessuras de reforço para tráfego muito pesado

| ESTRUTURA | 5.1 | 5.2 | 5.3 | 5.4 | 5.5 | 5.6 | 5.7 | 5.8 |
|-----------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Dc | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 | 130 | 140 | 150 |
| Mef | Tipo I | 11.768 | 8.509 | 6.366 | 4.897 | 3.854 | 3.092 | 2.521 |
| | Tipo II | 11.625 | 8.406 | 6.289 | 4.838 | 3.807 | 3.054 | 2.491 |
| | Tipo III | 22.248 | 16.087 | 12.036 | 9.259 | 7.286 | 5.845 | 4.767 |
| μ | Tipo I | 2,55 | 3,53 | 4,71 | 6,13 | 7,78 | 9,70 | 11,90 |
| | Tipo II | 2,58 | 3,57 | 4,77 | 6,20 | 7,88 | 9,82 | 12,05 |
| | Tipo III | 1,35 | 1,86 | 2,49 | 3,24 | 4,12 | 5,13 | 6,29 |
| Hc | Tipo I | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 |
| | Tipo II | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 |
| | Tipo III | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 |
| \overline{Dc} | Tipo I | 56,9 | 56,7 | 56,4 | 56,1 | 55,7 | 55,3 | 55,0 |
| | Tipo II | 56,7 | 56,4 | 56,1 | 55,8 | 55,4 | 55,1 | 54,7 |
| | Tipo III | 71,9 | 71,9 | 71,8 | 71,5 | 71,3 | 70,9 | 70,6 |
| hef | Tipo I | 8,5 | 8,5 | 8,6 | 8,7 | 8,8 | 8,9 | 9,0 |
| | Tipo II | 9,5 | 9,6 | 9,6 | 9,7 | 9,8 | 9,9 | 10,0 |
| | Tipo III | 9,6 | 9,6 | 9,6 | 9,7 | 9,7 | 9,8 | 9,8 |
| HR | Tipo I | 3,1 | 3,0 | 2,9 | 2,8 | 2,7 | 2,6 | 2,4 |
| | Tipo II | 2,7 | 2,7 | 2,6 | 2,4 | 2,3 | 2,2 | 2,0 |
| | Tipo III | 5,5 | 5,5 | 5,4 | 5,4 | 5,3 | 5,3 | 5,2 |

Fonte: PRÓPRIA (2012)

Para todos os casos o módulo de resiliência efetivo atingiu valores inferiores, o que indica que a deflexão atuante já iniciou a comprometer a estrutura, conforme ilustra o Gráfico 3.9:

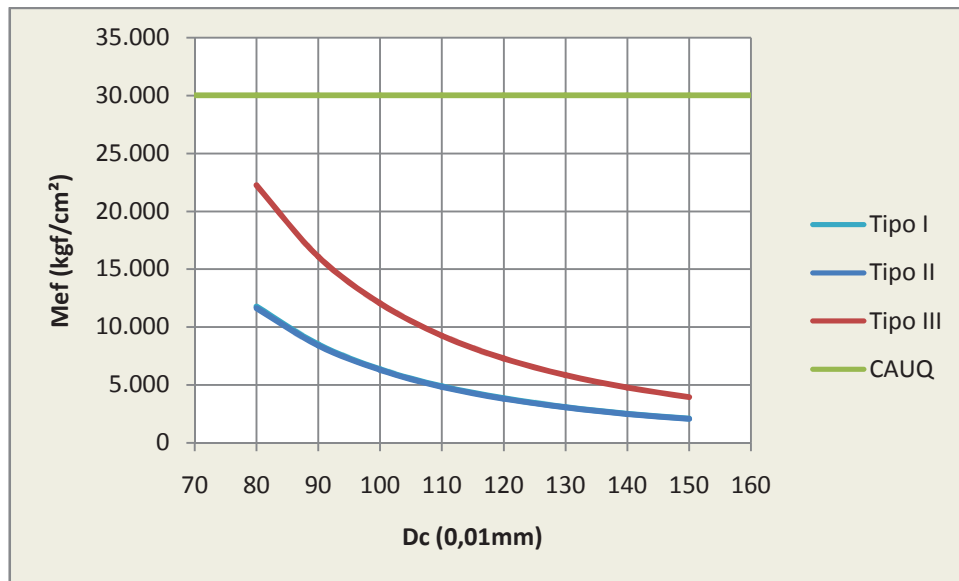


Gráfico 3.9 – Módulo de resiliência efetivo x Deflexão de projeto – Tráfego muito pesado
Fonte: PRÓPRIA (2012)

Tal fenômeno ocorre porque as deflexões propostas foram muito superiores à máxima admissível de $50,19 \times 10^{-2}$ mm. Mesmo após o corte observou-se que as deflexões continuaram muito acentuadas em todos os casos, (Gráfico 3.10).

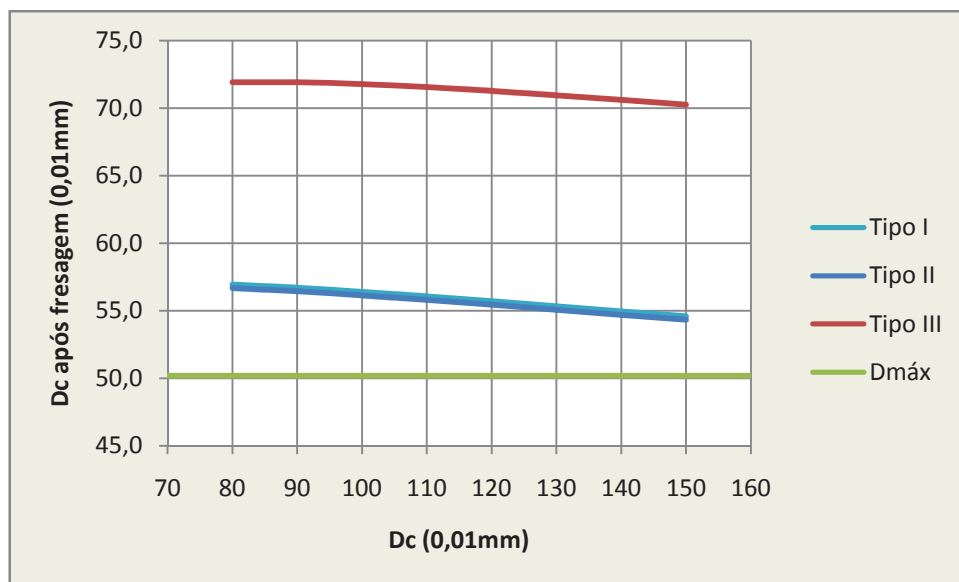


Gráfico 3.10 – Módulo de resiliência efetivo x Deflexão de projeto – Tráfego muito pesado
Fonte: PRÓPRIA (2012)

Levando-se em conta esse fator, as espessuras de reforço para diminuir a deflexão da estrutura tiveram que ser dimensionadas de tal modo que o greide acabasse por elevar-se significativamente, como expõe o Gráfico 3.11, que relacionada à espessura HR com a de $h_c + HR$.

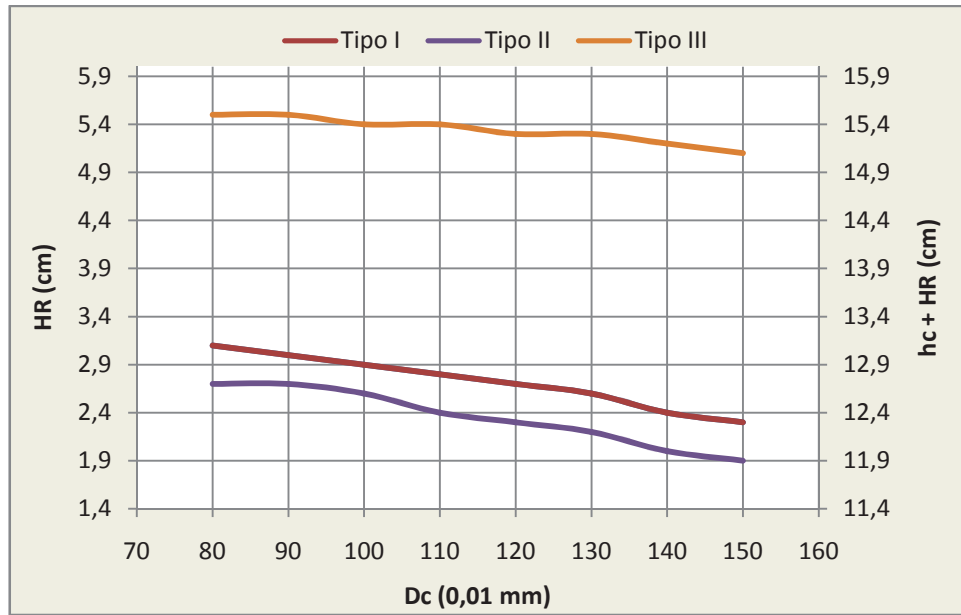


Gráfico 3.11 – Espessuras excedentes de reforço (HR) – Tráfego muito pesado
Fonte: PRÓPRIA (2012)

CAPÍTULO 4

4 COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

4.1 Comentários

Através da pesquisa bibliográfica e dos resultados obtidos observaram-se alguns pontos importantes acerca dos projetos de recuperação por fresagem, das quais cabe ressaltar:

- **Tipo de solo:** verificou-se a influência do tipo de solo sobre a estrutura de pavimento, sendo a porção silte responsável pela variação das espessuras de corte e reforço, influenciando de maneira significativa os acréscimos de revestimento em tráfegos mais intensos;
- **Deflexão:** a fresagem mostrou-se eficaz na redução da deflexão de projeto, o que esta diretamente relacionado ao alívio de tensões, proporcionando maior sobrevida à estrutura de pavimento;
- **Versatilidade:** como exposto, pode-se observar que a técnica é empregável em diversas situações, uma vez que a sorte de equipamentos é diversa. Ainda assim, cabe ressaltar que de toda forma a sua aplicação deve ser bem considerada, uma vez que a diversidade de equipamentos disponíveis a nível municipal é limitado;
- **Funcionalidade:** ainda que o procedimento mostre ganhos significativos, este só deve ser empregado enquanto as camadas de suporte não se encontrem completamente deterioradas, o que reforça a importância do alívio das tensões em medidas corretivas da manutenção das vias urbanas.

4.2 Conclusão

Com o trabalho mostrou-se que a técnica é oportuna para a recuperação de pavimentos urbanos, pelo fato que, a malha viária de cidades como a de São Paulo, devido a idade das vias, da falta de manutenção preventiva e principalmente do excesso de carga, encontra-se no fim da vida útil de serviço. Desse modo, vê-se na fresagem asfáltica uma alternativa para recobrar a serventia e funcionalidade dos pavimentos urbanos. Conclui-se teoricamente que, o método DNER PRO 269-94 atende o esperado, onde os resultados apresentados nesse trabalho apontaram sua grande eficácia em tráfegos de até

$2,0 \times 10^7$ solicitações (tráfego pesado), ainda que não se exclua sua utilização vias em tráfegos mais elevados, entretanto, com perda de funcionalidade devido ao aumento excessivo do greide da pista.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6502/95. **Rochas e solos: Terminologia**. Rio de Janeiro, 1995.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B., **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica Para Engenheiros**. 1 ed. Rio de Janeiro: Petrobras; Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto, 2006.

BONFIM, V. **Fresagem de pavimentos asfálticos**. 3 ed. São Paulo: Exceção, 2007.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. ET-DE-P00/038. **Fresagem de Pavimento Asfáltico**. São Paulo, 2006.

_____. ET-DE-P00/21. **Tratamentos Superficiais**. São Paulo, 2006.

_____. **Glossário de Termos Técnicos Rodoviários**. Rio de Janeiro, 1997. 296p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURAS E TRANSPORTE. **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. Rio de Janeiro, 2006.

NAKAHARA, S. M. **Estudo sobre o desempenho de reforços de pavimentos asfálticos em via urbana sujeita a tráfego comercial pesado**. 300 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2005.

PINTO, S. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos**. 478 p. Tese (Doutorado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 1991.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **IP-02. Classificação das Vias**. São Paulo, 2004.

_____. **IP-04. Instrução para Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis para Tráfego Leve e Médio**. São Paulo, 2004.

_____. **IP-05. Instrução para Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis para Tráfego Meio Pesado, Pesado, Muito Pesado e Faixa Exclusiva de Ônibus**. São Paulo, 2004.

_____. **IP-08. Análise Mecanicista à Fadiga de Estruturas de Pavimento**. São Paulo, 2004.

WIRTGEN. **The World of Wirtgen Cold Milling Machines**, Alemanha, 2011.

_____. **Picas para Fresadoras de Calzadas y más...**, Alemanha, 2007.