TÍTULO

PROJETO DE PAVIMENTAÇÃO

ÓRGÃO

DIRETORIA DE ENGENHARIA

PALAVRAS-CHAVE

Instrução. Projeto. Pavimentação.

APROVAÇÃO	PROCESSO

DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA

MINUTA

OBSERVAÇÕES

REVISÃO	DATA	DISCRIMINAÇÃO

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

ÍNDICE

1 RESUMO 3
2 OBJETIVO 3
3 DEFINIÇÕES 3
3.1 Pavimento 3
3.2 Tráfego 6
4 ETAPAS DE PROJETO 7
4.1 Estudo Preliminar 7
4.2 Projeto Básico 7
4.3 Projeto Executivo 7
5 ELABORAÇÃO DE PROJETO 8
5.1 Normas Gerais Aplicáveis 8
5.2 Materiais e Disposições Construtivas 9
5.3 Investigações Geológico-Geotécnicas 13
5.4 Critérios de Cálculo 18
5.5 Controle de Aceitação de Obra 47
5.6 Análise Técnico-Econômica e Ambiental 48
6 FORMA DE APRESENTAÇÃO 49
6.1 Estudo Preliminar 49
6.2 Projeto Básico 50
6.3 Projeto Executivo 51
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 52
ANEXO A – VALORES DO PERCENTUAL $T_{0,90}$ EM FUNÇÃO DOS VALORES *N-1* 55
ANEXO B – EXEMPLOS DE PLANILHAS DE CÁLCULO DE NÚMERO “N” 57
ANEXO C – EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA VERIFICAÇÃO MECANICISTA COM MÉTODO DE ROSENBLUETH 60
ANEXO D – MODELOS DE PLANILHAS DE QUANTIDADES DOS SERVIÇOS DE PAVIMENTAÇÃO 62

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

1 RESUMO

Esta Instrução de Projeto apresenta os procedimentos, critérios e padrões a serem adotados, como os mínimos recomendáveis, para a elaboração de projeto de pavimentação para o Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo – DER/SP.

2 OBJETIVO

Padronizar os procedimentos a serem adotados para elaboração de projeto de pavimentação no âmbito do DER/SP.

3 DEFINIÇÕES

Para os efeitos desta instrução de projeto, são adotadas as seguintes definições:

3.1 Pavimento

Estrutura constituída por diversas camadas superpostas, de materiais diferentes, construída sobre o subleito, destinada a resistir e distribuir ao subleito simultaneamente esforços horizontais e verticais, bem como melhorar as condições de segurança e conforto ao usuário.

3.1.1 Pavimento Flexível

Pavimento flexível é constituído por revestimento asfáltico sobre camada de base granular ou sobre camada de base de solo estabilizado granulometricamente. Os esforços provenientes do tráfego são absorvidos pelas diversas camadas constituintes da estrutura do pavimento flexível.

3.1.2 Pavimento Semirrígido

Pavimento semirrígido é constituído por revestimento asfáltico e camadas de base ou sub-base em material estabilizado com adição de cimento. O pavimento semirrígido é conhecido como pavimento do tipo direto quando a camada de revestimento asfáltico é executada sobre camada de base cimentada e do tipo indireto ou invertido quando a camada de revestimento é executada sobre camada de base granular e sub-base cimentada.

3.1.3 Pavimento Rígido

Pavimento rígido é constituído por placas de concreto de cimento *Portland* assentes sobre camada de sub-base granular ou cimentada. Quando a sub-base for cimentada pode, adicionalmente, haver uma camada inferior de material granular. Os esforços provenientes do tráfego são absorvidos principalmente pelas placas de concreto de cimento *Portland*, resultando em pressões verticais bem distribuídas e aliviadas sobre a camada de sub-base ou sobre a camada de fundação.

3.1.4 Pavimento de Peças Pré-moldadas de Concreto

Pavimento de peças pré-moldadas de concreto é constituído por revestimento em blocos pré-moldados de concreto de cimento *Portland* assentes sobre camada de base granular ou

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

cimentada. Pode ou não apresentar camada de sub-base granular quando a base for cimentada.

3.1.5 Pavimento Composto

Pavimento composto é constituído por revestimento asfáltico esbelto sobre placas de concreto de cimento *Portland* ou placas de concreto de cimento *Portland* sobre camada asfáltica.

3.1.6 Subleito

Camada compreendida entre a superfície da plataforma de terraplenagem e a superfície paralela, situada no limite inferior da zona de influência das pressões aplicadas na superfície do pavimento.

3.1.7 Reforço do Subleito

Camada requerida por imposição técnico-econômica, situada imediatamente acima do subleito. É constituída basicamente por material de empréstimo ou jazida.

3.1.8 Sub-base – Pavimento Flexível

Camada requerida por imposição técnico-econômica, situada entre o subleito ou reforço do subleito e a base. Pode ser constituída por materiais granulares graúdos, como pedregulhos, cascalhos, produtos de britagem que, embora selecionados, não atendam a todos os requisitos necessários à constituição de base de pavimento; solos estabilizados quimicamente com adição de cimento ou cal, ou simplesmente por material selecionado de empréstimo ou jazida.

3.1.9 Sub-base – Pavimento Rígido

Camada situada imediatamente abaixo das placas de concreto de cimento *Portland*. Pode ser constituída por materiais estabilizados granulometricamente ou estabilizados quimicamente com adição de cimento ou cal.

3.1.10 Base – Pavimento Flexível ou Semirrígido

Camada situada acima da sub-base. Pode ser constituída por materiais granulares, como pedregulhos, cascalhos e produtos de britagem, estabilizados com a adição de cimento ou material asfáltico quando necessário, solos estabilizados mecanicamente mediante mistura com produtos de britagem, ou solos estabilizados quimicamente com adição de cimento ou cal.

3.1.11 Revestimento Asfáltico

Camada situada sobre a base, constituindo a superfície de rolamento para os veículos. Pode ser constituído por tratamento superficial ou concreto asfáltico.

3.1.12 Pré-misturado à Frio ou Pré-misturado à Quente

A camada de pré-misturado à frio ou pré-misturado à quente pode ser utilizada como camada de revestimento, camada de base ou camada de regularização. O pré-misturado à frio é uma

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

mistura executada à temperatura ambiente em usina apropriada, composta de agregado mineral graduado, fíler e emulsão asfáltica, espalhada e comprimida à frio. O pré-misturado à quente é uma mistura à quente em usina apropriada de agregado mineral graúdo e material asfáltico espalhado e comprimido à quente.

3.1.13 Tratamento Superficial

Revestimento, constituído por camada de agregado aplicada sobre ligante asfáltico. Pode ser constituído por aplicação simples, dupla, tripla com ou sem capa selante.

3.1.14 Concreto Asfáltico – Camada de Ligação ou *Binder*

Camada situada entre a base e a capa de rolamento, utilizada nos casos em que a espessura requerida para o revestimento asfáltico seja elevada.

3.1.15 Concreto Asfáltico – Capa de Rolamento

Revestimento constituído por mistura de agregados com material asfáltico de características rigorosamente controladas.

3.1.16 Imprimação Asfáltica Ligante

Aplicação de material asfáltico sobre a superfície da base ou do revestimento asfáltico, antes da execução de nova camada asfáltica, a fim de promover a aderência com a camada subjacente.

3.1.17 Imprimação Asfáltica Auxiliar de Ligação

Aplicação de material asfáltico diluído sobre a superfície da base impermeabilizada ou sobre a camada asfáltica imprimada. A imprimação asfáltica auxiliar de ligação pode ser utilizada quando a execução da nova camada asfáltica ocorrer após determinado intervalo de tempo, a fim de promover a aderência com a camada subjacente.

3.1.18 Imprimação Asfáltica Impermeabilizante

Aplicação de material asfáltico sobre a superfície da base, antes da execução do revestimento asfáltico, a fim de aumentar a coesão da superfície da base decorrente da penetração da imprimação na parte superior desta camada, impermeabilizando-a e proporcionando condição de aderência entre o revestimento e a base.

3.1.19 Placas de Concreto de Cimento *Portland*

Placas de concreto de cimento *Portland* simples, armado ou protendido, interligadas por juntas longitudinais e transversais. As juntas longitudinais têm por função combater as tensões geradas por variações de temperatura e umidade. As juntas transversais combatem a fissuração gerada pela retração do concreto.

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

3.1.20 Drenagem do Pavimento

Sistema de drenagem constituído por base ou sub-base de materiais permeáveis e drenos rasos de captação com características adequadas, destinado à condução das águas infiltradas pelo revestimento através de trincas ou pelas bordas do pavimento ou através do subleito.

3.1.21 Módulo de Resiliência

Módulo de resiliência ou módulo de elasticidade de um material é a relação entre a tensão vertical aplicada repetidamente, σ_d, e a deformação axial recuperável, ε_a, que lhe corresponde após determinado número de aplicações de carga. Para materiais como solos, areias, agregados etc., em geral utiliza-se a denominação módulo de resiliência. Já para concretos de cimento *Portland*, solo-cimento, utiliza-se a denominação módulo de elasticidade.

3.1.22 Coeficiente de Poisson

Coeficiente de *Poisson* é a razão da deformação lateral ou radial pela deformação vertical ou axial recuperável e é considerado constante. Teoricamente o coeficiente de *Poisson* varia entre 0,0 no corpo rígido até 0,5 na deformação sem variação do volume.

3.2 Tráfego

3.2.1 Fator de Eixo – FE

Coeficiente que, multiplicado pelo volume total de tráfego comercial que solicitará o pavimento durante o período de projeto, fornece a estimativa do número de eixos que solicitarão o pavimento no mesmo período de projeto.

3.2.2 Fator de Equivalência Operacional – FEO

Coeficiente que, multiplicado pelo número de operações de uma determinada carga de eixo, simples ou tandem, fornece o número equivalente de operações do eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN.

3.2.3 Fator de Carga – FC

Coeficiente que, multiplicado pelo número de eixos que solicitarão o pavimento durante o período de projeto, fornece o número equivalente de operações do eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN.

3.2.4 Fator de Veículo – FV

Coeficiente que, multiplicado pelo volume total de tráfego comercial que solicita o pavimento durante o período de projeto, fornece o número equivalente de operações do eixo simples padrão no mesmo período, ou seja: $FV = FE \times FC$.

3.2.5 Fator Climático Regional – FR

Coeficiente que considera as variações de umidade dos materiais do pavimento durante as

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

diversas estações do ano.

3.2.6 Período de Projeto

Período adotado para o dimensionamento da estrutura do pavimento, de tal forma a desempenhar sua função de proporcionar trafegabilidade, conforto e segurança aos usuários durante este período. Adota-se, normalmente, período de projeto igual a 10 anos para pavimentos flexíveis e semirrígidos, e 20 anos para pavimentos rígidos.

4 ETAPAS DE PROJETO

O projeto de pavimento deve ser elaborado em três etapas, descritas a seguir.

4.1 Estudo Preliminar

Esta etapa corresponde às atividades relacionadas ao estudo geral de pavimento, baseado em dados de cadastros regionais e locais, observações de campo e experiência profissional de maneira a permitir a previsão preliminar da estrutura de pavimento e seu custo.

Deve-se procurar o contato direto com as condições físicas do local da obra através de reconhecimento preliminar, utilizando documentos de apoio disponíveis como mapas geológicos, dados de algum projeto existente na área de influência da obra e dados históricos do tráfego. A análise dos dados permite a previsão das investigações necessárias para a etapa de projeto subsequente, o projeto básico.

O estudo preliminar, ou anteprojeto, deve constituir-se de memorial descritivo com apresentação das alternativas de estruturas de pavimento acompanhadas de pré-dimensionamentos e a solução eleita a partir de análise técnico-econômica simplificada, desenhos de seção-tipo de pavimento, quantitativos dos serviços de pavimentação e orçamento preliminar.

4.2 Projeto Básico

Com os elementos obtidos nesta etapa, tais como: topografia, investigações geológico-geotécnicas, projeto geométrico, projeto de drenagem etc., devem ser estudadas alternativas de solução, com grau de detalhamento suficiente para permitir comparações entre elas, objetivando a seleção da melhor solução técnica e econômica para a obra.

O projeto básico deve constituir-se de memorial de cálculo com análise geológico-geotécnica, pesquisa de tráfego e cálculo do número “N” de solicitações do eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN, dimensionamento da estrutura de pavimento com verificação mecanicista, desenhos de seção-tipo transversal de pavimento, planta de localização dos tipos de pavimentos e planilha de quantidades com orçamento dos serviços de pavimentação.

4.3 Projeto Executivo

Nesta etapa, a solução selecionada no projeto básico deve ser detalhada a partir dos dados atualizados de campo, da topografia, das investigações geológico-geotécnicas

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

complementares, do projeto geométrico, do projeto de drenagem etc.

O projeto executivo deve constituir-se de memorial de cálculo com resultados das investigações geotécnicas e pesquisas de tráfego complementares para cálculo do número "N" de solicitações do eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN, dimensionamento da estrutura de pavimento com verificação mecanicista, controle de aceitação de obra, desenhos de seção-tipo transversal de pavimento, planta de localização dos tipos de pavimentos, detalhes construtivos e especificações de serviços e planilha de quantidades com orçamento dos serviços de pavimentação.

5 ELABORAÇÃO DE PROJETO

O projeto de pavimentação deve ser elaborado segundo os critérios apresentados a seguir.

Caso alguma norma necessária ao desenvolvimento do projeto não conste no referido item, a projetista deve incluí-la nos estudos e projetos após aprovação pelo DER/SP.

5.1 Normas Gerais Aplicáveis

5.1.1 Pavimentos Flexíveis e Pavimentos Semirrígidos

Para a elaboração do estudo preliminar de pavimentação deve ser adotado o método de dimensionamento de pavimentos flexíveis do DER/SP(1).

Para a elaboração dos projetos básico e executivo de pavimentação devem ser adotados, além do método de dimensionamento de pavimentos flexíveis do DER/SP(1), o método da resiliência constante no Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER(2).

Deve ser realizada a verificação mecanicista da estrutura de pavimento dimensionada pelos métodos do DER/SP e do DNER através do emprego de programa computacional. Na utilização de programas computacionais para a verificação mecanicista, devem ser fornecidas a descrição sucinta do programa computacional, as hipóteses de cálculo utilizadas e simplificações adotadas, dados de entrada e resultados obtidos.

É recomendável a utilização de estrutura de pavimento semirrígido em vias com número "N" de equivalentes de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN igual ou superior a 5×10^7.

A adoção de pavimentos semirrígidos deverá ser considerada em locais onde é possível se esperar a cura de material cimentado. Caso contrário, indicam-se soluções em pavimentos flexíveis com maiores espessuras.

5.1.2 Pavimentos Rígidos

Para a elaboração do estudo preliminar e dos projetos básico e executivo de pavimentação devem ser adotados os procedimentos de dimensionamento de pavimento de concreto da *Portland Cement Association* – PCA, versão de 1984 constante no Manual de Pavimentos

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

Rígidos do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT(3) e o da *American Association of State Highway and Transportation Officials* – AASHTO(4), versão de 1993.

Deve ser realizada, na etapa de elaboração do projeto executivo de pavimentação, a verificação mecanicista da estrutura. Na utilização de programas computacionais para a verificação mecanicista, devem ser fornecidas a descrição sucinta do programa computacional, as hipóteses de cálculo utilizadas e simplificações adotadas, dados de entrada e resultados obtidos.

5.1.3 Pavimentos de Peças Pré-moldadas de Concreto

Para a elaboração do estudo preliminar de pavimentação deve ser adotado o procedimento de dimensionamento constante no item 4.6.7 do Manual de Pavimentos Rígidos do DNIT(3).

Para a elaboração dos projetos básico e executivo de pavimentação devem ser adotados os procedimentos de dimensionamento de pavimento de peças pré-moldadas de concreto da *Portland Cement Association* – PCA, versão de 1984 constante do Manual de Instruções de Projeto da Prefeitura Município de São Paulo(5) e o do Manual de Pavimentos Rígidos DNIT(3).

Deve ser realizada a verificação mecanicista da estrutura de pavimento dimensionada pelos métodos do DNIT e da PCA através do emprego de programa computacional. Na utilização de programas computacionais para a verificação mecanicista, devem ser fornecidas a descrição sucinta do programa computacional, as hipóteses de cálculo utilizadas e simplificações adotadas, dados de entrada e resultados obtidos.

5.2 Materiais e Disposições Construtivas

Os materiais e serviços de pavimentação devem atender às especificações técnicas de serviço de pavimentação do DER/SP.

Os materiais ou misturas de materiais empregados nas diversas camadas constituintes da estrutura do pavimento devem atender também às seguintes prescrições.

5.2.1 Solos do Subleito

Para a camada de melhoria e preparo do subleito os solos devem apresentar as seguintes propriedades geotécnicas:

- capacidade de suporte medida pelo Índice de Suporte Califórnia (ISC) superior ou igual à 2%;
- expansão máxima de 2%;
- grau de compactação mínimo de 100% do Proctor Normal. Para solos finos lateríticos ou para solos granulares pode ser utilizada a energia de 100% do Proctor Intermediário.

No caso de aproveitamento do subleito de estradas já implantadas, cascalhadas, o solo na

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

profundidade de 0,20 m abaixo do greide preparado para receber o pavimento deve ser escarificado, umedecido e compactado na energia indicada anteriormente.

No caso de ocorrência de solos com ISC inferior a 2%, deve-se efetuar substituição destes solos na espessura a ser definida de acordo com os critérios adotados nos estudos geotécnicos.

Para subleito com solos de expansão superior a 2%, deve ser determinada, experimentalmente, a sobrecarga necessária para o solo apresentar expansão menor que 2%. O peso próprio do pavimento projetado deve transmitir para o subleito pressão igual ou maior do que a determinada pelo ensaio. Caso o peso próprio da estrutura não seja suficiente para proporcionar pressão maior ou igual à determinada no ensaio de sobrecarga, deve-se efetuar a substituição de solos em espessura definida nos estudos geotécnicos realizados.

As medidas de tratamento de solo que podem ser empregadas para facilitar a construção em subleitos incluem:

- drenagem do subleito;
- escavação e substituição de solo mole por material estável;
- execução de camada em material pétreo coberto por uma camada impermeável de reforço (ex: rachão, macadame seco, etc.);
- estabilização química da camada final de terraplenagem usando cal e/ou cimento;
- execução de uma camada de concreto magro, ou rolado;
- uso de geotêxteis;
- uma combinação das medidas anteriores.

Para os resultados dos ensaios de ISC realizados nas amostras obtidas, durante o controle de campo, que eventualmente apresentar ocorrência de locais com valores de ISC inferior ao ISC_P (Índice de Suporte Califórnia de Projeto) e/ou expansão superior a 2%, deve ser realizada a substituição do solo local por material com melhores propriedades geológico-geotécnicas. Para a determinação das espessuras necessárias de substituição devem ser executados ensaios de ISC com sobrecarga, conforme método de ensaio.

A escolha do material e da solução de substituição de solo utilizada devem ser suficientes para que sejam obtidos os níveis máximos de deflexão indicados no controle deflectométrico do projeto (referente ao ISC_P). A localização das substituições de solo deve ser compatibilizada com o projeto de terraplenagem.

5.2.2 Materiais para Reforço do Subleito

Os solos apropriados para camada de reforço do subleito são os de ISC superior ao do subleito e expansão máxima de 1%.

5.2.3 Materiais para Camadas de Sub-Base e Base

Os solos, misturas de solos, solos estabilizados quimicamente, materiais pétreos ou misturas

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

de solos quando empregados na camada de sub-base do pavimento devem apresentar as seguintes propriedades geotécnicas:

- capacidade de suporte, ISC, superior ou igual a 30%;
- expansão máxima de 1%.

Estes materiais ou misturas de materiais, quando empregados na camada de base do pavimento, devem apresentar as seguintes propriedades geotécnicas:

- capacidade de suporte, ISC, superior ou igual a 80%;
- expansão máxima de 1%.

Para misturas de solo-cimento, a resistência característica à compressão simples, avaliada aos 7 dias de idade, deve ser igual ou superior a 2,1 MPa.

Para misturas de solo melhorado com cimento, a resistência característica à compressão simples, avaliada aos 7 dias de idade, deve atender aos seguintes limites:

- sub-base: 1,2 a 2,1 MPa;
- base: 1,5 a 2,1 MPa.

Para brita graduada tratada com cimento, a mistura deve ser dosada de modo a obter resistência característica à compressão simples, avaliada aos 28 dias de idade, superior ou igual a 4,0 MPa e inferior a 6,2 MPa. A resistência à tração indireta no ensaio de compressão diametral, avaliada aos 28 dias de idade, deve ser superior ou igual a 0,7 MPa e inferior a 1,0 MPa.

Para concreto compactado com rolo, a mistura deve ter consumo mínimo de cimento variando de 85 kg/m^3 a 130 kg/m^3, e a resistência à tração na flexão, avaliada aos 7 dias de idade, deve ser superior ou igual a 5 MPa.

Para misturas recicladas com cimento, a resistência à compressão simples, avaliada aos 7 dias de idade, deve ser superior ou igual a 2,1 MPa e inferior a 2,5 MPa. A resistência à tração indireta no ensaio de compressão diametral, avaliada aos 7 dias de idade, deve ser superior ou igual a 0,25 MPa e inferior a 0,35 MPa.

Para misturas recicladas com espuma de asfalto, a taxa de expansão e meia-vida, assim como a resistência à tração indireta por compressão diametral devem atender, obrigatoriamente, às especificações técnicas de pavimentação do DER/SP.

A estabilização com espuma de asfalto depende da fração fina do material para dispersar o betume e a plasticidade elevada pode ocasionar conglomerados que se estabelecem como pontos fracos na camada reciclada. Dessa forma, se o índice de plasticidade do material a ser reciclado for superior a 10, recomenda-se o tratamento prévio com cal hidratada, separando as partículas e eliminando a plasticidade do material.

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

5.2.4 Materiais para Camadas de Rolamento e de Ligação ou *Binder*

Para as camadas de rolamento e de ligação ou *binder* tanto os agregados quanto os materiais asfálticos e a mistura resultante de concreto asfáltico usinado a quente ou pré-misturado a quente ou pré-misturado a frio devem atender, obrigatoriamente, às especificações técnicas de pavimentação do DER/SP.

A seleção do ligante asfáltico utilizado na mistura deve evitar a aplicação de ligantes moles em regiões com altas temperaturas, de modo a reduzir o fenômeno de deformação permanente impulsionado pela viscoelasticidade do material. De maneira análoga, em locais mais frios o ligante asfáltico deve ser escolhido com atenção ao fenômeno de trincamento por fadiga.

Para atender aos requisitos estruturais e funcionais, as camadas de rolamento e de ligação ou *binder* podem apresentar misturas asfálticas com ligante modificado. A modificação não é um meio de corrigir o ligante asfáltico de má qualidade, mas sim um aprimoramento das propriedades do ligante convencional e que deve ser aplicada com consideração cuidadosa.

Alguns dos benefícios que justificam a utilização de ligantes modificados são: aumento da rigidez das misturas em altas temperaturas, minimizando a deformação permanente; diminuição da rigidez em baixas temperaturas, melhorando a resistência à fadiga; melhoria da adesividade do ligante ao agregado; melhoria da resistência ao envelhecimento; dentre outros.

5.2.5 Concreto de Cimento *Portland*

Os pavimentos de concreto simples de cimento *Portland* devem ser dotados de barras de ligação e de transferência. As placas de concreto devem ser retangulares, com exceção das placas de concordância, que devem ser dotadas de armadura simples distribuída descontínua ou com adição de fibras de polipropileno. As placas devem possuir juntas longitudinais de articulação e transversais de retração conforme indicado no projeto.

As juntas de articulação e retração devem ser preenchidas com material do tipo polietileno, isopor, cortiça ou similar e preenchidas com selante. Estes materiais devem atender às exigências impostas pela especificação técnica de serviço de pavimentação do DER/SP.

Todos os materiais a serem utilizados na confecção do pavimento, tais como: cimento, agregados, água, aditivos, produto de cura e aço devem atender às exigências impostas pela especificação técnica de serviço do DER/SP.

O concreto deve ser dosado experimentalmente por qualquer método que correlacione resistência, durabilidade e fator água e cimento, levando-se em conta a trabalhabilidade específica para cada caso e deve atender, simultaneamente, as seguintes resistências características:

- tração por flexão igual ou superior a 4,5 MPa, aos 28 dias de idade;
- compressão axial igual ou superior a 33 MPa, aos 28 dias de idade.

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

5.2.6 Peças Pré-Moldadas de Concreto

As peças pré-moldadas de concreto de cimento *Portland* devem atender às exigências impostas pela especificação NBR 9781[(6)] e pela especificação técnica de serviço de pavimentação do DER/SP.

A resistência característica à compressão simples, aos 28 dias de idade, deve ser superior ou igual a 35 MPa para solicitações de veículos comerciais de linha e superior ou igual à 50 MPa quando houver tráfego de veículos especiais ou solicitações capazes de produzir acentuados efeitos de abrasão.

5.3 Investigações Geológico-Geotécnicas

As investigações geológico-geotécnicas devem ser realizadas em função das necessidades de detalhamento de cada etapa do projeto, relacionadas às etapas de estudo preliminar, projeto básico e projeto executivo.

Os estudos geológicos e geotécnicos devem ser executados de acordo com a Instrução de Projeto de Estudos Geológicos e com a Instrução de Projeto de Estudos Geotécnicos.

5.3.1 Estudo Preliminar

O estudo preliminar, ou anteprojeto, engloba a aquisição de informações disponíveis em mapas geológicos, e pedológicos, dados de estudos hidrológicos da região de influência da obra e de dados de projetos anteriores existentes na área de influência da obra. No caso de obras de duplicação ou de adequação de rodovias existentes, podem ser aproveitados na etapa de estudo preliminar os dados de geotecnia disponíveis no Banco de Dados do Sistema de Gerência de Pavimentos do DER/SP e/ou informações oficiais disponibilizadas no site.

Após a coleta dos dados mencionados anteriormente, o estudo preliminar deve prosseguir por meio de vistoria no campo por profissionais especializados, com comprovada experiência.

Na etapa de vistoria de campo devem ser coletadas as informações básicas relevantes para a elaboração do estudo de alternativas de estruturas de pavimentos e para a programação das etapas de estudos geotécnicos. Esta programação refere-se à amostragem sistemática e aos ensaios geotécnicos que serão contemplados nas etapas de projeto básico e de projeto executivo.

As seguintes informações básicas e mínimas relevantes para o estudo de alternativas de estruturas de pavimentos devem ser obtidas na etapa de vistoria de campo:

- existência ou não de materiais pétreos na região e estimativa de volume de exploração da rocha aparentemente sã da pedreira;
- verificação da localização de areais e estimativa de volume;
- verificação das condições topográficas;
- identificação expedita, táctil-visual, do subleito e dos solos das áreas de empréstimos, caso ocorram, considerando cor, macroestrutura, mineralogia e granulometria ou pelo método

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

expedito de pastilha proposto na metodologia Miniatura Compactada Tropical – MCT. (DER/SP M 196)[7];

- delimitação aproximada e estimativa de volume de pelo menos três áreas de empréstimos de solos.

5.3.2 Projeto Básico

Na etapa de projeto básico devem ser realizadas as seguintes atividades.

5.3.2.1 Realização de sondagens e ensaios geotécnicos com solos do subleito

A amostragem para os estudos geológico-geotécnicos deve ser realizada por meio de furos de sondagens, com espaçamento máximo entre dois furos consecutivos, no sentido longitudinal, de 200 m. Os furos de sondagens devem ser locados e amarrados no sistema de estaqueamento do projeto geométrico e com base em informações contidas na vistoria de campo realizada na etapa de estudo preliminar. Portanto, os furos de sondagens devem ser locados após a aprovação do projeto funcional e deverão ser posicionados nas bordas projetadas.

As sondagens para reconhecimento táctil-visual, coleta de amostras dos solos do subleito, traçado do perfil geotécnico do subleito e anotação da cota do nível d'água, se constatado, devem ser executados com auxílio de equipamentos manuais do tipo: trado espiral, cavadeira, pá, picareta etc.

A coleta de amostras dos solos de subleito através das sondagens deve considerar o material necessário para a realização do ensaio de módulo de resiliência (DNIT 134-ME) [9], conforme orientação da fiscalização.

Para implantação de trechos novos, a programação de ensaios deve ser baseada no perfil de terraplenagem.

A profundidade das amostras em relação ao greide acabado de terraplenagem deve ser de 1,5 m ou mais no caso de ocorrência de solos inadequados sujeitos a remoção.

Os ensaios geotécnicos devem ser realizados de forma a avaliar os materiais entre 0,0 m e 1,5 m abaixo da cota do greide final de terraplenagem, por meio da coleta de amostras de solos por horizonte verificado no furo executado. Caso haja mais de um horizonte avaliado na análise táctil-visual, devem ser coletadas e ensaiadas amostras representativas de cada horizonte.

Os solos do subleito devem ser estudados conforme os seguintes ensaios geotécnicos:

a) ensaios *in situ*: massa específica aparente do solo com emprego de cilindro de cravação, conforme NBR 9813[8], e teor de umidade natural;

b) ensaios de laboratório:

- compactação de solos com equipamento miniatura;
- determinação da perda de massa por imersão de solos compactados em

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

equipamento miniatura;

- Índice de Suporte Califórnia (ISC) e expansão;
- análise granulométrica completa de solos, incluindo ensaio de sedimentação;
- limites de Atterberg e classificação HRB;

Com os resultados do ensaio de compactação de solos com equipamento miniatura e do ensaio de determinação de perda de massa por imersão, classifica-se o solo de acordo com a Classificação Miniatura Compactada Tropical – MCT (DER/SP M 196) [(7)].

5.3.2.2 Realização de sondagens e ensaios geotécnicos com solos das áreas de empréstimo

A amostragem da jazida na etapa de projeto básico deve ser realizada por meio de, no mínimo, três furos de sondagens locados de forma a abranger toda a área da jazida de solos julgada aproveitável na inspeção de campo e delimitada aproximadamente na etapa de estudo preliminar.

As áreas de empréstimos devem ser cadastradas pela topografia amarrando-se as coordenadas das sondagens executadas, bem como das cotas da superfície da área, a localização e a distância em relação à rodovia em análise.

Deve ser coletada em cada furo e para cada horizonte de solo detectado, uma amostra suficiente para a realização de todos os ensaios geotécnicos de caracterização. Devem ser anotadas as cotas de mudança de camadas, adotando-se uma denominação expedita que as caracterize.

A área de empréstimo deve ser considerada satisfatória para a prospecção definitiva na etapa de projeto executivo quando os materiais coletados e ensaiados ou, pelo menos, parte dos materiais existentes satisfizerem às especificações vigentes, ou quando houver a possibilidade de correção por mistura com materiais de outras jazidas.

Os solos das áreas de empréstimo devem ser estudados conforme os ensaios geotécnicos citados no item 5.3.2.1.

As sondagens do projeto básico devem ser estudadas conforme os ensaios correntes do tipo: *in situ* e laboratoriais.

As jazidas do projeto básico devem ser estudadas conforme ensaios correntes com a adição do ensaio de Módulo de Resiliência (MR) (DNIT 134-ME) [(9)] a critério da fiscalização.

5.3.2.3 Pesquisa de ocorrência de material pétreo

Na etapa de projeto básico devem ser coletadas amostras de rochas por meio de sondagens rotativas no paredão rochoso da pedreira inventariada na etapa de estudo preliminar para serem submetidas aos ensaios:

- abrasão *Los Angeles*;

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

- sanidade;
- adesividade;
- análise petrográfica, se solicitada pela fiscalização;
- compressão uniaxial;
- índices físicos;
- índice de forma de fragmentos;
- análise granulométrica.

Os critérios de aceitação do material pétreo devem estar em concordância com os requisitos indicados nas Especificações Técnicas do DER/SP dos materiais ao qual será incorporado.

No caso de utilização no projeto de pedreira comercial, devem ser anexadas as licenças de instalação, exploração e operação da empresa.

5.3.3 Projeto Executivo

Na etapa de projeto executivo, as investigações devem ser complementadas para atender às necessidades de detalhamento da solução de pavimentação selecionada no projeto básico. Portanto, na etapa de projeto executivo devem ser realizadas as atividades descritas a seguir.

5.3.3.1 Realização de sondagens e ensaios geotécnicos com solos do subleito

A amostragem da rodovia, para fins geotécnicos, na etapa de projeto executivo deve ser realizada por meio de furos de sondagens, com espaçamento máximo entre dois furos consecutivos, no sentido longitudinal, de 100 m. Os furos de sondagem devem ser locados e amarrados ao sistema de estaqueamento do projeto geométrico, considerando os furos já executados na etapa de projeto básico.

É fundamental a indicação correta das posições dos furos de sondagens e as suas profundidades de coleta de amostras. Dessa forma, tenta-se evitar que ocorram situações onde os resultados dos ensaios geotécnicos das amostras de solos estudadas sejam inutilizados devido aos erros cometidos quando da programação dos furos de sondagens pela não observância de detalhes do projeto geométrico.

Os ensaios a serem realizados nas amostras de solos coletadas no subleito na etapa de projeto executivo são idênticos aos apresentados no item 5.3.2.1, somando-se o ensaio de Módulo de Resiliência (DNIT 134-ME) [(9)] em, no mínimo, 10% das amostras coletadas das sondagens à trados e poços de inspeção do projeto executivo, sendo à critério da fiscalização a solicitação de quantidade superior de amostras a serem ensaiadas.

5.3.3.2 Realização de sondagens e ensaios geotécnicos com solos das áreas de empréstimo

Verificada a possibilidade de aproveitamento técnico-econômico de uma área de empréstimo, baseado nos resultados dos ensaios laboratoriais realizados nas amostras de solos da jazida

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

ensaiada na etapa de projeto básico, bem como da viabilidade de exploração da área, deve ser realizado o estudo definitivo na etapa de projeto executivo.

A partir do levantamento topográfico da área a ser explorada, lança-se um reticulado com malha de 50 m de lado, dentro dos limites da ocorrência selecionada, onde serão executados novos furos de sondagens.

Deve ser coletada em cada furo e para cada horizonte de solo detectado, uma amostra suficiente para a realização de todos os ensaios geotécnicos de caracterização. Devem ser anotadas as cotas de mudança de camadas, adotando-se uma denominação expedita que as caracterize.

Os ensaios geotécnicos a serem realizados nas amostras de solos coletadas nas jazidas na etapa de projeto executivo são idênticos aos apresentados no item 5.3.2.1.

As jazidas do projeto executivo devem ser estudadas conforme ensaios correntes com a adição do ensaio de Módulo de Resiliência (MR) em todos dos furos.

5.3.3.3 Pesquisa de ocorrência de material pétreo

Na etapa de projeto executivo, se necessário, deve ser providenciado o lançamento de um reticulado com malha de 20 m de lado, dentro dos limites da ocorrência selecionada, onde serão realizados novos furos de sondagens rotativas.

Os ensaios laboratoriais a serem realizados na etapa de projeto executivo são idênticos aos apresentados no item 5.3.2.3.

No caso de utilização no projeto de pedreira comercial, devem ser anexadas as licenças de instalação, exploração e operação da empresa.

5.3.3.4 Pesquisa de ocorrência de areias

Na etapa de projeto executivo devem ser realizados ensaios laboratoriais com o objetivo de obtenção de informações a respeito das propriedades geotécnicas das areias a serem utilizadas na obra.

As informações com relação às propriedades geotécnicas do areal devem ser obtidas por certificados fornecidos pelos proprietários ou pela coleta de amostras e posterior realização de ensaios laboratoriais.

Os ensaios laboratoriais que devem ser apresentados para o areal são:

- composição granulométrica;
- módulo de finura;
- diâmetro máximo;
- massa específica real;
- massa específica aparente;

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

- teor de argila.

No caso de utilização no projeto de areal comercial devem ser anexadas as licenças de instalação, exploração e operação da empresa.

5.3.3.5 Realização de ensaios especiais

Os ensaios especiais que se tornarem necessários para o detalhamento do projeto executivo podem ser solicitados pelo DER/SP.

Os ensaios especiais usualmente necessários na etapa de elaboração do projeto executivo são:

- dosagem de misturas cimentadas como solo melhorado com cimento, solo-cimento, solo-brita-cimento, brita graduada tratada com cimento, concreto compactado com rolo, para a determinação do teor ótimo de cimento *Portland* e da resistência obtida da mistura;
- dosagem de misturas de solo e brita para a determinação do ISC e da porcentagem de brita necessária na mistura;
- ensaio *Marshall* para a determinação da estabilidade e da fluência do concreto asfáltico;
- ensaio de módulo de resiliência de misturas de solo-brita, solo melhorado com cimento, solo-cimento, solo-brita-cimento, brita graduada tratada com cimento, base estabilizada granulometricamente, reforço do subleito com solos selecionados, concreto asfáltico etc.

5.4 Critérios de Cálculo

5.4.1 Concepção da Estrutura do Pavimento

A estrutura do pavimento deve ser concebida de acordo com a disponibilidade de materiais nas proximidades da obra, conforme as características dos esforços solicitantes provenientes do tráfego, das propriedades geotécnicas dos solos do subleito e das condições climáticas da área de implantação da obra, ou de acordo com outras necessidades, tais como o prazo de execução da obra.

A estrutura do pavimento pode ser do tipo flexível, semirrígido ou rígido.

5.4.2 Parâmetros de Projeto

5.4.2.1 Capacidade de suporte do subleito

A capacidade de suporte do subleito é medida através do ensaio de penetração conhecido como Índice de Suporte Califórnia, e o valor de capacidade de suporte de projeto, ISC_P, é utilizado para o dimensionamento da estrutura do pavimento.

A programação de sondagens deve ser definida indicando a locação da coleta de amostras para a realização dos ensaios de ISC e buscando caracterizar o subleito do pavimento a ser implantado. Devem ser observados os pontos físicos notáveis, como por exemplo, Obras de

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

Arte Especiais, corpos hídricos, áreas de corte e aterro, e a geometria da via a ser implantada. Desta forma, não devem ser amostrados locais onde a profundidade do subleito projetado seja superior a 2,5 m. Para trechos contíguos onde se possa caracterizar o subleito com sondagens a trado, deve-se utilizar espaçamento máximo de 200 m entre pontos analisados. A programação deve ser apresentada e aprovada pelo DER/SP antes da realização da coleta.

Após a coleta das amostras programadas, os resultados devem ser analisados pelo projetista e recomenda-se que, previamente à segmentação homogênea, os resultados sejam agrupados em função do tipo de solo, conforme a classificação MCT, a fim de se identificar locais que apresentem características similares para auxiliar na determinação do tipo de estrutura a ser implantada. A classificação do solo também poderá ser realizada de acordo com a classificação HRB, SUCS ou outra, desde que aprovada previamente pelo DER/SP.

Na sequência, o trecho rodoviário deverá ser dividido em segmentos homogêneos com relação ao valor da capacidade de suporte do subleito. Para isso, pode-se realizar a segmentação homogênea dos trechos com base nos valores de ISC utilizando o método das diferenças acumuladas da AASHTO[(4)]. Por fim, para cada segmento homogêneo realiza-se o cálculo do valor de ISC_P que deverá ser utilizado no dimensionamento da estrutura de pavimento.

As amostras de solos para a determinação da capacidade de suporte de projeto devem ser coletadas nas áreas de cortes e nas caixas de empréstimo que serão utilizadas para a execução das últimas camadas dos aterros.

O ISC_P é determinado através da seguinte expressão matemática:

$$ISC_p = \overline{ISC} - \frac{\sigma \; x \; t_{0,90}}{\sqrt{n-1}}$$

Onde:

$\overline{ISC}$: média aritmética dos valores de ISC das “n” amostras ensaiadas;

$t_{0,90}$: coeficiente de *Student* relativo ao intervalo de confiança de 90%;

σ : desvio padrão da população dos valores de ISC das “n” amostras ensaiadas.

$$\overline{ISC} = \frac{\sum ISC_i}{n}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (ISC_i - \overline{ISC})^2}{n}}$$

O resultado de ISC_P deve ser um número inteiro com arredondamento para baixo, de modo que sua consideração no projeto seja sempre a favor da segurança.

Os valores do percentual $t_{0,90}$ em função dos valores de *n-1* são mostrados no Anexo A.

Para o cálculo do ISC_P, valores individuais de ISC acima de 20% devem ser limitados, de tal

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

forma que qualquer amostra com valor excedente deve ser considerada no cálculo com seu valor substituído por 20%.

O cálculo do ISC_P contemplará todas as amostras ensaiadas. Para os locais cujo ISC é inferior ao resultado do ISC_P, um tratamento específico deverá ser realizado a fim de melhorar a capacidade de suporte do solo local e atender ao ISC_P.

O projetista deve selecionar o valor de ISC_P de modo a garantir a solução mais econômica, ou seja, evitar custos excessivos com tratamento de solo e garantir uma estrutura que melhor se adeque as solicitações climáticas e de tráfego durante a vida útil do pavimento.

Para o caso de dimensionamento de pavimentos flexíveis e pavimentos semirrígidos pelo método da resiliência, é necessário, além do conhecimento da capacidade de suporte dos solos do subleito, classificar os solos do subleito quanto à resiliência.

Os solos finos coesivos são os solos que apresentam mais de 35% do material, em peso, passando na peneira de 0,075 mm, que com frequência encontram-se em subleitos ou em camadas de reforço do subleito. São classificados, de acordo com os parâmetros de resiliência determinados em ensaios triaxiais dinâmicos, nos seguintes tipos:

- solos tipo I: solos com baixo grau de resiliência que apresentam bom comportamento como subleito e reforço de subleito, com possibilidade de utilização em camada de sub-base.
- solos tipo II: solos com grau de resiliência intermediário que apresentam comportamento regular como subleito. Seu uso como reforço de subleito requer estudos e ensaios especiais.
- solos tipo III: solos com grau de resiliência elevado, cujo emprego em camadas de pavimentos não é aconselhável. Requerem cuidados e estudos especiais para uso como subleito.

A Tabela 1 permite classificar o solo em função da porcentagem de silte na fração fina, *S*, ou seja, fração que passa na peneira de abertura de 0,075 mm e o valor ISC correspondente.

Tabela 1 – Classificação dos Solos Finos Quanto à Resiliência

ISC (%)	*S* (%)		
	≤ 35	35 a 65	> 65
≥ 10	I	II	III
6 a 9	II	II	III
2 a 5	III	III	III

$$S = 100 - \left(\frac{P_1}{P_2} \times 100 \right)$$

Onde:

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

S: porcentagem de silte na fração fina que passa na peneira de abertura de 0,075 mm;

P_1: porcentagem, em peso, de material cujas partículas tenham diâmetro inferior a 0,005 mm, determinada na curva de distribuição granulométrica;

P_2: porcentagem, em peso, de material cujas partículas tenham diâmetro inferior a 0,075 mm, determinada na curva de distribuição granulométrica.

Os ensaios de granulometria com sedimentação devem ser realizados para os solos contendo mais de 35% de material, em peso, passando na peneira de 0,075 mm de abertura.

5.4.2.2 Tráfego

O tráfego para o dimensionamento de pavimentos pode ser caracterizado de várias formas, porém a mais utilizada é a determinação do número "N" de equivalentes de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN para um determinado período de projeto. Também, no caso de dimensionamento de pavimento rígido utiliza-se o número acumulado de repetições dos vários tipos de eixos e cargas obtido para um determinado período de projeto. No Brasil, os principais modelos e métodos de dimensionamentos de pavimento utilizam o número "N", excetuando-se o procedimento de dimensionamento de pavimento rígido da *Portland Cement Association* – PCA que utiliza o número acumulado de repetições dos vários tipos de eixos e cargas.

O número "N" de equivalentes de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN é a transformação de todos os tipos de eixos e cargas dos veículos comerciais que trafegarão sobre o pavimento em um eixo simples padrão de rodas duplas equivalente de 80 kN. Consideram-se apenas os veículos comerciais no cálculo do número "N", visto que os automóveis possuem carga de magnitude desprezível em relação aos veículos comerciais.

O número "N" é calculado pela expressão:

$$N = 365 \times VDM_T \times FV \times FR \times Fp \times Ff \times D \times 10^{Zc \times S_0}$$

Onde:

N: número equivalente de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN acumulado para o período de projeto;

VDM_T: volume diário médio de veículos comerciais total acumulado no período de projeto nos dois sentidos de tráfego;

FV: fator de veículo;

FR: fator climático regional;

Fp: porcentagem de veículos comerciais na faixa de projeto (%);

Ff: fator de frota (%), que é a porcentagem de veículos comerciais na faixa de projeto;

D: distribuição direcional (%);

Z_C: desvio normal padrão associado a um nível de confiabilidade;

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

S_0: desvio padrão da previsão do tráfego.

Para a determinação do volume total acumulado de veículos comerciais que trafegará nos dois sentidos da via durante o período de projeto é utilizada a seguinte expressão:

$$VDM_T = VDM_0 \times \left[\frac{(1+t)^P - 1}{t}\right]$$

Onde:

VDM_0: volume diário médio de veículos comerciais no início do primeiro ano do período de projeto;

t: taxa anual de crescimento do tráfego (%);

P: período de projeto igual a 10 anos para pavimento flexível ou semirrígido e 20 anos para pavimento rígido.

O número "N" considera a variabilidade dos parâmetros que o compõe a partir de um nível de confiabilidade e o desvio padrão (S_0), que devem ser determinados em função do tipo de via e do volume diário médio de veículos comerciais, conforme especificado na Tabela 2.

Tabela 2 – Nível de Confiabilidade e Desvio Padrão do Tráfego em Função da Classe da Via

Classe da Via	Nível Recomendado de Confiabilidade (%)	Desvio padrão - S_0	
		Pav. Flexível	Pav. Rígido
Autoestrada	95 - 97,5	0,45	0,35
Rodovia: VDM > 2000	90 - 97,5	0,45	0,35
Rodovia: VDM ≤ 2000	85 - 95	0,45	0,35
Arteriais: VDM > 500	85 - 95	0,40	0,35
Outras: VDM ≤ 500	80 - 90	0,40	0,35

Os valores de Z_C em função dos níveis de confiabilidade podem ser obtidos em uma Tabela de Distribuição Normal Padrão e são apresentados, resumidamente, na Tabela 3.

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

Tabela 3 – Valores de Z_C em Função dos Níveis de Confiabilidade

Confiabilidade	Z_C
50%	0,000
55%	0,126
60%	0,266
65%	0,384
70%	0,524
75%	0,674
80%	0,842
85%	1,037
90%	1,282
95%	1,645
99%	2,326
99,9%	3,090

O volume diário médio de veículos comerciais, VDM_0, na etapa de estudo preliminar deve ser baseado na Estatística de Tráfego do DER/SP. Já nas etapas de projetos básico e executivo devem ser realizadas contagens de tráfego, bem como estimativas de taxa de crescimento anual, de acordo com a Instrução de Projeto de Elaboração de Estudos de Tráfego.

O fator de veículo da frota, *FV*, multiplicado pelo volume de veículos comerciais que trafega na via, fornece o número de eixos equivalentes de operações do eixo padrão.

Para a determinação do *FV* é necessário se conhecer a composição do tráfego assim como as várias cargas por tipo de eixo que atuarão sobre o pavimento. Para tanto é necessário a realização de pesquisas de contagem de tráfego ou de pesagem na área de influência do projeto.

Para o cálculo do FV é utilizada a seguinte expressão:

$$FV = \sum_{i=1}^{i=k} FV_i$$

Onde:

i: categoria do veículo, variando de 1 a k;

FV_i: fator de veículo da categoria i.

A determinação dos fatores de veículos individuais ocorre conforme a expressão abaixo.

$$FV_i = \sum_{j=1}^{j=m} FEO_j$$

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

Onde:

j: tipo de eixo, variando de 1 a m;

m: número de eixos do veículo i;

FEO: fator de equivalência de operações correspondente ao eixo j do veículo i.

Quando se dispõe apenas de dados de contagem de veículos, deve-se estimar o percentual de veículos trafegando na carga máxima legal e vazios. Recomenda-se a consideração de até 30% de veículos vazios.

O cálculo do *FV* da frota depende da determinação inicial dos fatores de equivalência de operação (FEO) de cada um dos veículos que trafegarão sobre o pavimento. A determinação do FEO possui duas metodologias: a da *United States Army Corps of Engineers* – USACE preconizada pelo DNIT (Tabela 4), e a da *American Association of State Highway and Transportation Officials* – AASHTO (Tabela 5).

Tabela 4 – Fatores de Equivalência de Operação (FEO) da USACE

Tipos de Eixo	Faixas de Cargas (tf)	Equações (P em tf)
Eixo simples	0 – 8	$FEO = 2{,}0782 \times 10^{-4} \times P^{4{,}0175}$
	≥ 8	$FEO = 1{,}8320 \times 10^{-6} \times P^{6{,}2542}$
Eixo tandem duplo	0 – 11	$FEO = 1{,}5920 \times 10^{-4} \times P^{3{,}4720}$
	≥ 11	$FEO = 1{,}5280 \times 10^{-6} \times P^{5{,}4840}$
Eixo tandem triplo	0 – 18	$FEO = 8{,}0359 \times 10^{-5} \times P^{3{,}3549}$
	≥ 18	$FEO = 1{,}3229 \times 10^{-7} \times P^{5{,}5789}$
P = Peso bruto total sobre o eixo		

Tabela 5 – Fatores de Equivalência de Operação (FEO) da AASHTO

Tipos de Eixo	Equações (P em tf)
Simples de rodagem simples	$FEO = \left(\frac{P}{7{,}77}\right)^{4{,}32}$
Simples de rodagem dupla	$FEO = \left(\frac{P}{8{,}17}\right)^{4{,}32}$
Tandem duplo (rodagem dupla)	$FEO = \left(\frac{P}{15{,}08}\right)^{4{,}14}$
Tandem triplo (rodagem dupla)	$FEO = \left(\frac{P}{22{,}95}\right)^{4{,}22}$
P = Peso bruto total sobre o eixo	

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

Quando se tem dados de pesagem, o *FV* pode ser determinado pelo produto entre o fator de eixo, *FE*, e o fator de carga, *FC*. O *FE* é um número que, multiplicado pelo número de veículos correspondentes, representa o número de eixos. O *FC* é o número que, multiplicado pelo número de eixos que operam, resulta no número de eixos equivalentes ao eixo padrão.

Para a consideração do efeito causado pelas variações de umidade dos materiais constituintes do pavimento durante as diversas estações do ano, o que se traduz em variações da capacidade de suporte dos materiais, multiplica-se o número "N" por um coeficiente denominado fator climático regional, *FR*. Na pista experimental da AASHTO, *FR* variou de 0,2, representando ocasiões em que prevaleceram baixos teores de umidade, a 5,0, caracterizando ocasiões em que os materiais estavam praticamente saturados. No Brasil, costuma-se adotar *FR* igual a 1,0, considerando os resultados de pesquisas desenvolvidas pelo DNER.

No Anexo B estão ilustrados exemplos de planilhas de cálculo do número "N" de equivalentes de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN.

Para os pavimentos rígidos, o tráfego é determinado a partir do número de repetições de carga dos diferentes tipos de eixo, grupados em intervalos de carga para o período de projeto.

É necessário, portanto, o conhecimento do volume de tráfego de veículos comerciais, classificados por tipo de veículo, ano a ano, para o período de projeto; do percentual do tráfego que atua na faixa mais solicitada; e da carga por tipo de eixo dos veículos comerciais, por intervalo de carga, feita por pesquisa de cargas por eixo.

Para se conhecerem os vários tipos de eixos e suas respectivas cargas que atuarão sobre o pavimento a ser projetado é necessária a realização de pesquisas de pesagem na área de influência do projeto para posterior estudo.

Entretanto, caso não se consigam dados de pesagens de veículos e se autorizados pela fiscalização do DER/SP, podem ser adotados os valores de cargas por tipo de eixo conforme exemplo no Anexo B.

5.4.2.3 Drenagem

A drenagem superficial da rodovia deve ser suficientemente adequada para escoar a água de forma rápida para fora da plataforma, não permitindo o acúmulo de água e, consequentemente, a infiltração para o interior da estrutura do pavimento.

Caso seja necessária, deve ser prevista a utilização de dispositivos de drenagem subsuperficial na estrutura de pavimento.

O lençol d'água subterrâneo deve estar rebaixado a, pelo menos, 1,5 m em relação ao greide da terraplenagem acabada.

5.4.3 Dimensionamento Estrutural de Pavimento

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

5.4.3.1 Pavimentos flexíveis

a) Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo – DER/SP

O método de dimensionamento de pavimentos flexíveis do DER/SP(1) tem como base o método de dimensionamento do DNER de 1966, com algumas reformulações.

O método fornece a estrutura de pavimento necessária para suportar o tráfego previsto durante o período de projeto adotado e para as condições geotécnicas dos solos do subleito vigentes na obra rodoviária, de modo a transmitir ao subleito tensões compatíveis com sua capacidade de suporte e permitir o tráfego de veículos.

Dependendo dos materiais e espessuras das camadas, dois ou mais pavimentos podem ser estruturalmente equivalentes. Com base nos resultados da pista experimental da AASHTO e nos materiais que compõem o pavimento, a sua equivalência estrutural pode ser estabelecida pelos coeficientes de equivalência estrutural K.

Os tipos e espessuras mínimas de revestimento asfáltico são dados em função do número "N" de equivalentes de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN, acumulado durante o período de projeto. A Tabela 6, diferentemente da tabela que consta no método, indica as espessuras mínimas de revestimento asfáltico recomendadas em função da experiência do DER/SP.

Tabela 6 – Tipos e Espessuras Mínimas de Revestimento

Tipo e Espessura do Revestimento Asfáltico	Número "N"
Tratamentos superficiais asfálticos duplos e triplos	$N \leq 1 \times 10^6$
Revestimento asfáltico com 5,0 cm de espessura	$1 \times 10^6 < N \leq 5 \times 10^6$
Revestimento asfáltico com 7,5 cm de espessura	$5 \times 10^6 < N \leq 1 \times 10^7$
Revestimento asfáltico com 10,0 cm de espessura	$1 \times 10^7 < N \leq 2{,}5 \times 10^7$
Revestimento asfáltico com 12,5 cm de espessura	$2{,}5 \times 10^7 < N \leq 5 \times 10^7$
Revestimento asfáltico com 15,0 cm de espessura	$N > 5 \times 10^7$

A espessura da camada de revestimento pode ser inferior às indicadas na Tabela 6, desde que a verificação mecanicista da estrutura de pavimento seja satisfeita.

A Tabela 7 recomenda as faixas granulométricas das misturas asfálticas selecionadas em função do número "N", por tipo de aplicação.

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

Tabela 7 – Faixas Granulométricas por Tipo de Aplicação

Número "N"	Camada de Rolamento	Camada de Ligação (*Binder*)	Camada de Reperfilagem(*)
$N \leq 1 \times 10^6$	DER 12,5	DER 19,0 ou DER 25,0	DER 4,75
$1 \times 10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	DER 12,5	DER 19,0 ou DER 25,0	DER 4,75
$5 \times 10^6 < N \leq 1 \times 10^7$	DER 12,5	DER 19,0 ou DER 25,0	DER 4,75 ou DER 9,5
$1 \times 10^7 < N \leq 2,5 \times 10^7$	DER 12,5, SMA, CPA ou GAP-GRADED	DER 19,0 ou DER 25,0	DER 4,75 ou DER 9,5
$2,5 \times 10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	DER 12,5, SMA, CPA ou GAP-GRADED	DER 19,0 ou DER 25,0	DER 4,75 ou DER 9,5
$N > 5 \times 10^7$	SMA, CPA ou GAP-GRADED	DER 19,0 ou DER 25,0	DER 4,75 ou DER 9,5

*Reperfilagem: camada de regularização de deformações de pequena amplitude, sem função estrutural.

A seleção da mistura asfáltica com graduação contínua deve seguir as recomendações e as faixas granulométricas estabelecidas na ET-DE-P00/027[(10)].

O uso de misturas asfálticas com granulometria descontínua em camada de rolamento é recomendado para tráfegos elevados, com N superior a 1×10^7, sendo obrigatório para N superior a 5×10^7. Também deve-se priorizar essas misturas em rodovias com velocidade de operação maior ou igual a 80 km/h.

O tipo de ligante para o revestimento asfáltico deve ser escolhido em função das condições climáticas, conforme recomendações do item 5.2.4. Para tráfego elevado, com N superior a 5×10^7, deve-se adotar misturas descontínuas com o emprego de ligantes modificados por polímero.

Para revestimento de concreto asfáltico sobre base cimentada, recomenda-se a execução de tratamento superficial simples ou duplo com ligantes asfálticos modificados entre a base e o revestimento asfáltico, como ponte de aderência e camada de antirreflexão de trincas.

As bases de solo arenoso fino de comportamento laterítico e de solo laterítico argiloso somente devem ser utilizadas para tráfego inferior a 5×10^6 equivalentes de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN. Deve ser executada camada de tratamento superficial simples sobre a camada de base com o objetivo de melhorar a interface entre a camada de base e a camada de revestimento em concreto asfáltico.

A espessura total da base e revestimento necessária para proteção da sub-base deve ser determinada considerando a capacidade de suporte ISC igual a 20%, mesmo se o material apresentar capacidade de suporte superior a 20%.

No entanto, se o ISC da sub-base for igual ou superior a 40% e para $N \leq 5 \times 10^6$ equivalentes de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN, admite-se substituir H_{20} na inequação $R \times K + B \times K_B \geq H_{20}$, por $0,8 \times H_{20}$. Para $N \geq 5 \times 10^7$ equivalentes de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN, deve-se substituir, na mesma inequação, H_{20} por $1,2 \times H_{20}$.

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

A determinação das espessuras do pavimento é feita com base nas espessuras equivalentes dos materiais em termos de material granular, expressa através de seus coeficientes de equivalência estrutural (K). A Tabela 8 apresenta esses coeficientes para os diferentes materiais constitutivos do pavimento.

Tabela 8 – Coeficientes de equivalência estrutural

Componentes do pavimento	Coeficiente K
Base ou revestimento de concreto asfáltico	2,00
Base ou revestimento de pré-misturado a quente, de graduação densa	1,70
Base ou revestimento de pré-misturado a frio, de graduação densa	1,40
Base ou revestimento asfáltico por penetração	1,20
Base reciclada com espuma de asfalto em usina	1,50
Base reciclada com espuma de asfalto *in situ*	1,40
Camadas granulares	1,00
Solo cimento com resistência à compressão a 7 dias, superior a 45 kgf/cm²	1,70
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 45 kgf/cm² e 28 kgf/cm²	1,40
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 28 kgf/cm² e 21 kgf/cm²	1,20
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, inferior a 21 kgf/cm²	1,00

O coeficiente estrutural do reforço do subleito ou da sub-base granular deve ser igual a 1,0 toda vez que o ISC do material de um ou do outro for igual ou superior a três vezes o do subleito. Para relações inferiores, o coeficiente deve ser dado pela expressão:

$$K_{REF} = \sqrt[3]{\frac{ISC_1}{3 \times ISC_2}}$$

Onde:

K_{REF}: coeficiente estrutural do reforço ou do subleito;

ISC_1 : capacidade de suporte do reforço do subleito ou da sub-base (%);

ISC_2: capacidade de suporte do subleito (%).

Se o ISC_1 do reforço ou da sub-base for superior a 20%, para efeito de cálculo da relação ISC_1 / ISC_2 deve ser considerado como se fosse igual a 20%.

A partir do conhecimento dos materiais a serem empregados nas demais camadas e de seus respectivos coeficientes de equivalência estrutural, assim como da espessura mínima de revestimento em função do nível de tráfego, é possível aplicar as equações de dimensionamento do método, apresentadas a seguir.

$$K_R \times R + K_B \times B \geq H_{20}$$

$$K_R \times R + K_B \times B + K_S \times h_{20} \geq H_n$$

$$K_R \times R + K_B \times B + K_S \times h_{20} + K_{REF} \times h_n \geq H_m$$

Em que:

K_R = coeficiente de equivalência estrutural do revestimento;

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

R = espessura do revestimento;

K_B = coeficiente de equivalência estrutural da base;

B = espessura da base;

H_{20} = espessura de pavimento necessária para proteger a sub-base;

K_S = coeficiente de equivalência estrutural da sub-base;

h_{20} = espessura da sub-base;

H_n = espessura de pavimento necessária para proteger o reforço do subleito;

K_{REF} = coeficiente de equivalência estrutural do reforço do subleito;

h_n = espessura do reforço do subleito;

H_m = espessura total de pavimento necessária para proteger um material com ISC igual a m%.

Os valores de H_{20}, H_n e H_m das expressões acima são obtidos a partir do ábaco de dimensionamento da Figura 1 ou determinados pela equação de dimensionamento do método do DNIT(3).

$$H_t = 77{,}67 \times N^{0{,}0482} \times ISC^{-0{,}598}$$

b) Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método da Resiliência

O método de dimensionamento da Resiliência do DNER(2) considera a capacidade de suporte do subleito e das camadas de solos e granulares, como também suas propriedades resilientes, ou sejam, as deformações elásticas ou recuperáveis destes materiais sob a ação de cargas repetidas.

A resiliência excessiva faz-se notar mesmo em pavimentos bem dimensionados por critérios de resistência à ruptura plástica, sempre que as deflexões, deslocamentos elásticos verticais recuperáveis, medidas em provas de carga com viga *Benkelman* são elevados, ou quando o trincamento da superfície é prematuro. É o fenômeno da fadiga dos materiais que se manifesta em revestimentos asfálticos e bases cimentadas.

Quando se utiliza o método CBR de dimensionamento de pavimentos flexíveis, como o método de dimensionamento de pavimentos flexíveis do antigo DNER e do DER/SP, não há como considerar explicitamente a resiliência. Pode-se, quando muito, estabelecer restrições específicas a determinados materiais e estruturas de pavimentos, e isto de modo totalmente empírico.

A análise de tensões e deformações de estruturas de pavimentos como sistemas de múltiplas camadas e a aplicação da teoria da elasticidade e do método dos elementos finitos, deram ensejo à consideração racional das deformações resilientes no dimensionamento de pavimentos.

O método é um procedimento baseado em modelos de resiliência, considerando a deflexão máxima prevista de uma estrutura proposta para uma determinada expectativa de vida de fadiga. Na metodologia, considera-se o valor estrutural da camada asfáltica em função do tipo de subleito e do tráfego de projeto, considerando ainda o comportamento elástico não-linear dos solos e materiais granulares da estrutura de

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

pavimento.

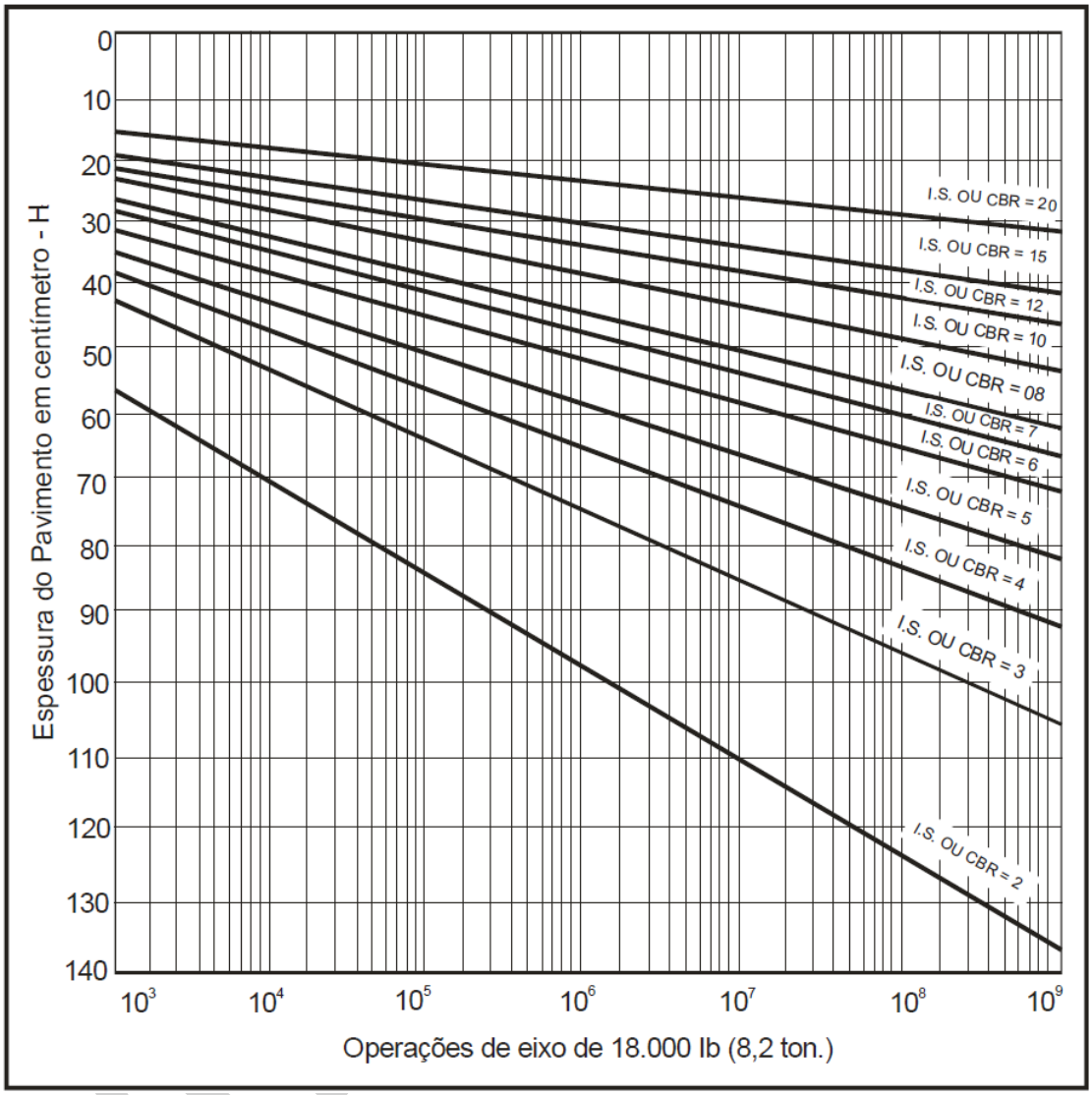

Figura 1: Ábaco de dimensionamento do Manual de Pavimentação do DNER[2]

É apresentada uma equação matemática que correlaciona a espessura total do pavimento em termos de material granular com coeficiente de equivalência estrutural K igual a 1,0 em função da capacidade de suporte ISC dos solos do subleito e do tráfego representado pelo número "N". O método define a espessura mínima de revestimento asfáltico necessária para a deflexão de projeto e para as constantes relacionadas às características resilientes do subleito.

Estabelece-se, ainda, uma equação de fadiga resultante de ensaios de compressão diametral de cargas repetidas sob tensão controlada que permita, para fins de projeto, relacionar a deflexão do pavimento com o número cumulativo de repetições do eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN.

Recomenda-se que a somatória das espessuras das camadas de base, sub-base e reforço

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

do subleito, constituídas por materiais granulares, tais como: solo arenoso pedregulhoso, solo estabilizado granulometricamente, solo-brita, brita graduada e macadame, que contenham menos de 35% de material, em peso, passando na peneira de abertura de 0,075 mm, seja inferior ou igual a 0,35 m.

c) verificação mecanicista

A verificação mecanicista da estrutura de pavimento é realizada por meio da análise de deslocamentos, tensões e deformações. São considerados críticos o deslocamento vertical recuperável máximo na superfície do revestimento asfáltico, a deformação horizontal específica de tração na fibra inferior do revestimento e a deformação vertical de compressão no topo do subleito. O deslocamento vertical recuperável na superfície do revestimento e a deformação horizontal de na fibra inferior da camada de revestimento estão relacionados com a fadiga, e a deformação vertical de compressão no topo do subleito está relacionada com a deformação permanente ou plástica.

Para a verificação mecanicista de estruturas de pavimentos podem ser utilizados diversos programas computacionais com métodos de análise de elementos finitos ou métodos das diferenças finitas. Entretanto os cálculos processados por computadores devem vir acompanhados dos documentos justificativos, a seguir discriminados:

- no caso de programas computacionais usualmente comercializados no mercado nacional: identificação do programa computacional; descrição do programa computacional utilizado, definindo os módulos utilizados, as hipóteses de cálculo utilizadas ou simplificações adotadas, dados de entrada, carregamento e resultados obtidos;
- no caso de programas computacionais de uso particular e exclusivo do projetista: identificação e descrição do programa computacional utilizado, com indicação da formulação teórica, hipóteses de cálculo utilizadas ou simplificações adotadas, dados de entrada, carregamento e resultados obtidos.

Os valores de carga, coeficiente de *Poisson* e módulos resilientes dos materiais constituintes das camadas da estrutura do pavimento são aqueles indicados no item 5.4.4.1 e as equações de fadiga são as indicadas no item 5.4.4.2.

Caso a projetista opte pela adoção de outros modelos de fadiga, estes devem ser justificados quanto à confiabilidade de seus resultados.

A critério da fiscalização, para rodovias de maior importância e tráfego elevado, a variabilidade do módulo de elasticidade das camadas constituintes do pavimento pode ser considerada na simulação computacional, por meio de método iterativo.

Recomenda-se a utilização do método das estimativas pontuais, originalmente concebido por Rosenblueth (1975), que consiste na determinação da média e da variância de uma série de valores de 2^n termos, sendo “n” o número de parâmetros envolvidos na análise. Como exemplo, em estruturas de pavimentos asfálticos de três camadas, a variabilidade dos módulos de elasticidade do revestimento, base, sub-base e subleito deve ser considerada, resultando em $2^4 = 16$ análises.

As expressões para o cálculo dos valores médios, “E”, segundo esta metodologia são apresentadas nas expressões abaixo.

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

$E[y^m] = \frac{1}{2}(y_+^m + y_-^m)$ para uma variável $y = f(x_1)$

$E[y^m] = \left(\frac{1}{2}\right)^2 (y_{++}^m + y_{+-}^m + y_{-+}^m + y_{--}^m)$ para duas variáveis $y = f(x_1, x_2)$

$E[y^m] = \left(\frac{1}{2}\right)^3 (y_{+++}^m + y_{++-}^m + y_{+-+}^m + y_{+--}^m + y_{-++}^m + y_{-+-}^m + y_{--+}^m + y_{---}^m)$ para três variáveis $y = f(x_1, x_2, x_3)$

O valor característico de deformação, tensão e deslocamento deve ser calculado a partir da média e do desvio padrão dos resultados, conforme a seguinte expressão.

$$\varepsilon_c = \bar{\varepsilon} + \sigma$$

Onde:

ε_c = deformação, tensão ou deslocamento característico;

$\bar{\varepsilon}$ = deformação, tensão ou deslocamento médio;

σ = desvio padrão.

No Anexo C consta um exemplo dos parâmetros utilizados na verificação mecanicista e das combinações a serem analisadas conforme o método de Rosenblueth.

d) recomendações gerais

O emprego da mesma estrutura de pavimento para a pista de rolamento e para os acostamentos tem efeitos benéficos no comportamento da estrutura de pavimento da pista de rolamento, facilitando a drenagem e o procedimento construtivo.

As camadas de reforço do subleito, sub-base e base podem ser idênticas para a pista de rolamento e para os acostamentos.

Para a escolha da camada de revestimento dos acostamentos pode-se considerar o tráfego nos acostamentos como sendo da ordem de até 5% do tráfego na pista de rolamento.

Para rodovias de tráfego pesado com número “N” de equivalentes de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN superior ou igual a 5 x 10^7, recomenda-se considerar tráfego nos acostamentos da ordem de até 10% do tráfego da pista de rolamento para a escolha da camada de revestimento dos acostamentos.

O acostamento deve sempre ter estrutura de custo mais baixo do que a da pista de rolamento, exceto em casos excepcionais, como: corredor de grandes cargas e vias de elevado volume de tráfego com picos elevados em ocasiões específicas, quase sempre localizadas nas proximidades da cidade de São Paulo.

Recomenda-se o emprego de dreno de pavimento em todos os pontos baixos e passagens de corte para aterro e vice-versa, cujas extensão e localização devem ser definidas pelo projeto de drenagem.

5.4.3.2 Pavimentos semirrígidos

a) Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo – DER/SP

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

O método de dimensionamento de pavimentos flexíveis do DER/SP[(1)] pode ser utilizado na etapa de estudo preliminar para obtenção da estrutura do pavimento semirrígido.

O procedimento de dimensionamento de pavimento semirrígido é idêntico ao empregado para pavimento flexível, ressalvando o coeficiente estrutural para camadas de base e sub-base cimentadas que depende diretamente da resistência à compressão simples aos 7 dias de idade dos corpos de prova.

Para o caso de base e sub-base de solo-cimento devem-se adotar os coeficientes estruturais iguais a 1,2, 1,4 e 1,7 para as resistências à compressão simples aos 7 dias de idade entre 2,1 MPa e 2,8 MPa; entre 2,8 MPa e 4,5 MPa e superior a 4,5 MPa, respectivamente.

Para o caso de base e sub-base de brita graduada tratada com cimento deve-se adotar o valor de 1,7 para o coeficiente estrutural do material.

A critério da fiscalização, para rodovias de maior importância e tráfego elevado, pode ser solicitada a verificação mecanicista do pavimento semirrígido considerando a variabilidade dos parâmetros. Nesse caso, pode ser empregado o método de Rosenblueth apresentado no item 5.4.3.1.

b) Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER

Para o dimensionamento de pavimento semirrígido pelo método do DNER, deve-se definir preliminarmente o tipo de solo da camada de subleito quanto à resiliência. Sub-bases granulares são consideradas como solo tipo III.

O método de dimensionamento do DNER considera um sistema de três camadas, ou seja, uma estrutura de pavimento constituída por revestimento asfáltico, base cimentada e sub-base ou subleito.

Calcula-se a tensão de tração, σ_t, e a tensão vertical de compressão, σ_v, na fibra inferior da camada cimentada de acordo com as equações definidas para solos tipo I, II e III, e comparam-se os valores obtidos com os valores admissíveis de tensões de tração e de compressão.

Para o cálculo das tensões de tração e de compressão na camada cimentada é necessário o conhecimento prévio das espessuras das camadas de revestimento asfáltico e de base cimentada, bem como o valor do módulo de elasticidade da camada de base, motivo pelo qual deve-se realizar pré-dimensionamento do pavimento semirrígido pelo método do DER/SP. A determinação do módulo de elasticidade da camada cimentada pode ser realizada pela equação que correlaciona o módulo com a resistência à compressão simples aos 28 dias de idade, apresentada no método de dimensionamento do DNER.

O método limita o valor da tensão vertical de compressão a 0,1 MPa para solos tipo I e a 0,05 MPa para solos tipo II e III.

A tensão de tração admissível na camada cimentada deve ser inferior ou igual a 70% da resistência à tração estática por compressão diametral.

A espessura da camada de base cimentada de acordo com o método do DNER deve ser superior a 15 cm. Recomenda-se utilizar espessura mínima de 17 cm.

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

c) verificação mecanicista

Para pavimento de estrutura semirrígida valem as mesmas considerações realizadas para pavimentos flexíveis com relação à verificação mecanicista da estrutura dimensionada.

No entanto, são considerados críticos o deslocamento vertical recuperável máximo na superfície do revestimento asfáltico, a deformação horizontal de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico, a tensão horizontal de tração na fibra inferior da camada cimentada e a deformação vertical de compressão no topo do subleito.

d) recomendações gerais

Para pavimento de estrutura semirrígida valem as mesmas recomendações realizadas para pavimentos flexíveis.

Recomenda-se, ainda, a execução de tratamento superficial simples ou duplo sobre a camada de base cimentada, como ponte de aderência entre a camada de rolamento de concreto asfáltico e a camada de base cimentada, como também camada antirreflexão de trincas da camada cimentada para a camada asfáltica.

Para a verificação mecanicista da estrutura de pavimento semirrígido com base ou sub-base de solo melhorado com cimento ou solo-cimento é imprescindível o conhecimento do módulo de elasticidade da mistura. Portanto, recomenda-se, após a dosagem da mistura de solo melhorado com cimento ou solo-cimento, a determinação em laboratório do valor do módulo de elasticidade.

5.4.3.3 Pavimentos rígidos

a) *Portland Cement Association* – PCA

O procedimento de dimensionamento da PCA[11], versão de 1984, baseia-se em estudos teóricos clássicos sobre placas de concreto desenvolvidos por H. M. Westergaard e G. Pickett, em análises de computador empregando elementos finitos de autoria de S. D. Tayabji e B. E. Colley, em ensaios de laboratório e de modelos sobre o comportamento de juntas, sub-bases e acostamentos e sua influência no desempenho do pavimento, em pistas experimentais, especialmente a da AASHTO, em estudos realizados por órgãos rodoviários e aeroportuários e em observações metódicas de pavimentos em serviço.

Os métodos clássicos de dimensionamento de pavimentos rígidos baseiam-se na consideração das propriedades mecânicas do concreto, representadas pela resistência à tração na flexão, pelo suporte da fundação do pavimento e pelas características do carregamento. Os procedimentos atuais de dimensionamento de pavimentos rígidos permitem prever o comportamento da estrutura quanto à fadiga do concreto, à erosão da fundação do pavimento e à possibilidade de desnivelamento das juntas transversais, com consequente formação de degraus ou escalonamento das juntas sob o tráfego.

O procedimento exige o conhecimento da distribuição de frequência das cargas por tipo de eixo. As informações necessárias para o dimensionamento do pavimento de concreto são:

- cargas por eixo simples, tandem duplo e tandem triplo;

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

- fator de segurança para as cargas;
- número previsto de repetições das cargas por eixo durante o período de projeto;
- resistência característica à tração na flexão do concreto, $f_{ctM,k}$, aos 28 dias de idade;
- coeficiente de recalque do subleito ou do sistema subleito e sub-base;
- tipo de junta transversal, com ou sem barra de transferência;
- tipo de acostamento, se de concreto ou não.

O dimensionamento faz-se pelas análises de fadiga e de erosão da fundação do pavimento, de modo sistematizado por tabelas e ábacos.

Para o dimensionamento da estrutura de pavimento de concreto devem-se adotar os seguintes parâmetros:

- resistência característica à tração na flexão, $f_{ctM,k}$, superior ou igual a 4,5 MPa, aos 28 dias de idade;
- fator de segurança de cargas, variável entre 1,0 e 1,3. Recomenda-se adotar o valor de 1,2 para rodovias que possuirão controle de pesagem dos caminhões ou rodovias em que a malha rodoviária lindeira tenha controle de pesagem; e 1,3 para rodovias que não possuirão controle de pesagem dos caminhões;
- período de projeto de no mínimo 20 anos.

b) *American Association of State Highway and Transportation Officials* – AASHTO

O procedimento de dimensionamento de pavimento rígido da AASHTO[(4)], versão de 1993, foi desenvolvido com base nos resultados de desempenho da pista experimental da AASHTO, sendo aplicado para pavimentos de concreto simples, pavimentos de concreto simples com ou sem barras de transferência e pavimentos de concreto com armadura distribuída contínua e descontínua.

O método da AASHTO[(4)] fornece a espessura necessária para a placa de concreto pela equação definida experimentalmente na pista de testes da AASHTO, em Illinois/EUA, para determinada perda de serventia do pavimento durante o período de vida útil da rodovia. A equação definida experimentalmente na pista de testes da AASHTO, bem como os parâmetros e as hipóteses de projeto a serem adotados, encontram-se descritos detalhadamente no manual da AASHTO de 1993, *Guide for Design of Pavement Structures*[(4)].

Para o cálculo da espessura necessária para a placa de concreto é necessário definir:

- nível de confiabilidade do projeto, que é função da classe funcional do sistema viário. Recomenda-se adotar nível de confiabilidade entre 85% e 95%;
- desvio padrão global associado à precisão na previsão do tráfego de projeto. Os valores do desvio padrão global oscilam entre 0,30 e 0,40 para pavimentos rígidos. Quando a variância do tráfego futuro projetado é considerada juntamente com outras variâncias de modelos de previsão de desempenho de pavimentos, o valor estimado para o desvio padrão global é de 0,39. Para o caso onde a variância não é considerada, o valor estimado é de 0,34. Se, nos estudos detalhados de tráfego utilizando-se pesagens de veículos em movimento, for possível a previsão do

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

tráfego de projeto com maior precisão e, consequentemente, menor variância, pode-se adotar o valor do desvio padrão global de 0,37;

- coeficiente de drenagem para o cálculo da espessura necessária para a placa de concreto. O coeficiente de drenagem é função da qualidade da drenagem, que pode variar desde péssima até excelente, e da porcentagem do tempo durante o ano em que o pavimento se encontrará em níveis de umidade se aproximando do estágio de saturação. O coeficiente de drenagem é igual a 0,70 para pavimentos com qualidade da drenagem péssima e de mais de 25% do tempo durante o ano em condições próximas à saturação. Para pavimentos com drenagem excelente e de menos de 1% do tempo durante o ano em condições próximas à saturação, o coeficiente é igual a 1,25;

- coeficiente de transferência de carga, que exerce grande influência no cálculo da espessura da placa de concreto, além do grau de entrosamento dos agregados e da presença ou não de acostamentos de concreto ou de asfalto. O coeficiente de transferência de carga é função do tipo de pavimento, ou seja, pavimento de concreto simples com e sem barras de transferência ou pavimento de concreto continuamente armado. O coeficiente depende, também, da existência de acostamentos de concreto ou de asfalto e da existência ou não de dispositivos de transferência de carga. Para pavimentos de concreto com juntas reforçadas, com acostamento de concreto e com dispositivos de transferência de carga, o valor do coeficiente de transferência de carga varia entre 2,5 e 3,1. Para a mesma condição, porém, sem dispositivos de transferência de carga, o valor do coeficiente oscila entre 3,6 e 4,2. Para pavimentos de concreto com juntas reforçadas, com acostamento de asfalto e com dispositivos de transferência de carga, o valor do coeficiente de transferência de carga pode ser adotado 3,2. Para a mesma condição, porém, sem dispositivos de transferência de carga, o valor do coeficiente varia entre 3,8 e 4,4.

  Para pavimentos de concreto continuamente armados, os valores dos coeficientes de transferência de carga são inferiores aos recomendados para pavimentos de concreto simples;

- além dos parâmetros já mencionados, é necessário o conhecimento do número “N” de equivalentes de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN durante o período de projeto adotado, do módulo de elasticidade e do módulo de ruptura do concreto de cimento *Portland*, do módulo de reação do subleito ou do sistema subleito e sub-base, dos índices de serventia no início e no final do período de projeto e da variação de serventia durante o período de projeto.

c) verificação mecanicista

A verificação mecanicista da estrutura de pavimento rígido é realizada por meio da análise de tensões e deformações. São consideradas críticas a tensão ou a deformação da placa de concreto, bem como da sub-base cimentada, se houver.

Para a verificação mecanicista de estruturas de pavimentos rígido podem ser utilizados diversos programas computacionais com métodos de análise de elementos finitos. Entretanto os cálculos processados por computadores devem vir acompanhados dos documentos justificativos, a seguir discriminados:

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

- no caso de programas computacionais usualmente comercializados no mercado nacional: identificação do programa computacional; descrição do programa computacional utilizado, definindo os módulos utilizados, as hipóteses de cálculo utilizadas ou simplificações adotadas, dados de entrada, carregamento e resultados obtidos;
- no caso de programas computacionais de uso particular e exclusivo do projetista: identificação e descrição do programa computacional utilizado, com indicação da formulação teórica, hipóteses de cálculo utilizadas ou simplificações adotadas, dados de entrada, carregamento e resultados obtidos.

Os valores de carga, coeficiente de *Poisson* e módulos resilientes dos materiais constituintes das camadas da estrutura do pavimento são aqueles indicados no item 5.4.2.4.

Devem ser utilizadas na análise mecanicista as equações de fadiga da placa de concreto contidas na metodologia da PCA.

d) recomendações gerais

Para a estrutura de pavimento rígido valem as mesmas considerações mencionadas para a estrutura de pavimento flexível.

Embora o pavimento rígido não requeira altos índices de suporte da fundação para seu bom funcionamento, o pavimento de concreto beneficia-se largamente da adoção de sub-base estável e não bombeável. Este material impede a ocorrência de bombeamento de solos finos plásticos, uniformiza o suporte da fundação, evita o efeito danoso à estrutura do pavimento decorrente de mudanças excessivas de volume de solos instáveis do subleito e aumenta o valor do coeficiente de recalque, diminuindo a espessura das placas de concreto.

Para rodovias de tráfego intenso e pesado, devem-se adotar, obrigatoriamente, barras de transferência de esforços de cargas.

Para o projeto de juntas em pavimentos rodoviários de concreto deve ser utilizado o Estudo Técnico ET-13 da Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP[12].

5.4.3.4 Pavimentos de peças pré-moldadas de concreto

a) *Portland Cement Association* – PCA

O procedimento de dimensionamento de pavimentos de peças pré-moldadas de concreto de cimento *Portland* da PCA[11], versão de 1984, é empregado tanto para pavimentos rodoviários onde o carregamento da estrutura do pavimento é resultante de esforços solicitantes provenientes de caminhões, reboques e semirreboques, quanto para pavimentos industriais onde o carregamento da estrutura é resultante de esforços provenientes de guindastes, empilhadeiras de grande porte e transportadores de contêineres.

Para o dimensionamento de pavimentos de peças pré-moldadas de concreto de cimento *Portland* rodoviários é necessário o conhecimento da capacidade de suporte dos solos do subleito e o número equivalente de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN acumulado para o período de projeto.

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

O procedimento de dimensionamento da PCA[11] leva em consideração o intertravamento das peças pré-moldadas de concreto e pressupõe a resistência crescente das camadas a partir do subleito, de modo que as deformações por cisalhamento e por consolidação dos materiais sejam pequenas a ponto de reduzir ao mínimo as deformações verticais permanentes.

Para número "N" superior a 5×10^6, devem-se adotar bases tratadas com cimento e sub-bases granulares. Para número "N" inferior ou igual a 5×10^6, podem-se adotar bases e sub-bases granulares. Já para tráfego com número "N" inferior a 1×10^6, o material da sub-base deve apresentar valor de capacidade de suporte, ISC, mínimo de 20%. Para tráfego com número "N" entre 1×10^6 e 1×10^8, a capacidade de suporte da sub-base deve ser superior ou igual a 30%.

A capacidade de suporte, ISC, da camada de base, quando esta for granular, deve ser superior ou igual a 80%.

O fator de equivalência estrutural proposto pelo método da PCA para camadas cimentadas é de 1,65 em relação às bases puramente granulares. Logo, a resistência à compressão simples aos 7 dias de idade deve ser superior a 4,5 MPa.

Recomenda-se as espessuras mínimas de 0,15 m e de 0,10 m para as camadas de materiais puramente granulares e de materiais tratados com cimento, respectivamente.

As peças pré-moldadas de concreto devem atender à exigência da norma brasileira NBR 9781[6]. Devem apresentar as seguintes espessuras e resistências à compressão simples em função do tráfego previsto para o período de projeto representado pelo número "N" de solicitações do eixo simples padrão:

- $N \leq 5 \times 10^6$: espessura das peças de concreto igual a 0,06 m e resistência à compressão simples mínima de 35 MPa;
- $5 \times 10^6 < N \leq 1 \times 10^7$: espessura das peças de concreto igual a 0,08 m e resistência à compressão simples mínima de 35 MPa;
- $N > 1 \times 10^7$: espessura das peças de concreto igual a 0,10 m e resistência à compressão simples mínima de 50 MPa.

As peças pré-moldadas de concreto devem ser assentadas sobre uma camada de areia na espessura compactada variando entre 0,03 m e 0,05 m. Recomenda-se a espessura compactada de 0,04 m.

b) Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes – DNIT

O procedimento de cálculo do DNIT[3] apresenta expressão matemática em função da carga por roda e o valor da capacidade de suporte do subleito, para determinação da espessura total do pavimento, bem como a espessura da base e sub-base.

A metodologia de cálculo é apresentada no item 4.6.7 do Manual de Pavimentos Rígidos do DNIT[3].

c) verificação mecanicista

Para pavimento de revestimento de peças pré-moldadas de concreto de cimento *Portland* valem as mesmas considerações efetuadas para estruturas de pavimentos flexíveis e semirrígidos, com relação à verificação mecanicista da estrutura

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

dimensionada. São consideradas críticas a tensão da base cimentada, se houver, e a deformação vertical de compressão no topo do subleito.

Para a verificação mecanicista de estruturas de pavimentos podem ser utilizados diversos programas computacionais com métodos de análise de elementos finitos ou métodos das diferenças finitas. Entretanto, os cálculos processados por computadores devem vir acompanhados dos documentos justificativos, a seguir discriminados:

- no caso de programas computacionais usualmente comercializados no mercado nacional: identificação do programa computacional; descrição do programa computacional, definindo os módulos utilizados, as hipóteses de cálculo utilizadas ou simplificações adotadas, dados de entrada, carregamento e resultados obtidos;
- no caso de programas computacionais de uso particular e exclusivo do projetista: identificação e descrição do programa computacional utilizado, com indicação da formulação teórica, hipóteses de cálculo utilizadas ou simplificações adotadas, dados de entrada, carregamento e resultados obtidos.

Os valores de carga, coeficiente de *Poisson* e módulos resilientes dos materiais constituintes das camadas da estrutura do pavimento são aqueles indicados no item 5.4.2.4, bem como as equações de fadiga.

Caso a projetista opte pela adoção de outros modelos de fadiga, estes devem ser justificados quanto à confiabilidade de seus resultados.

5.4.4 Verificação Mecanicista

5.4.4.1 Parâmetros de projeto para a verificação mecanicista

Para a verificação mecanicista da estrutura de pavimento, é necessário o conhecimento dos parâmetros relativos à capacidade de suporte dos solos do subleito e do tráfego previsto para o período de projeto, além das propriedades dos materiais constituintes das camadas da estrutura do pavimento e de modelos de fadiga para estes materiais.

As cargas a serem inseridas na análise mecanicista devem simular o eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN, utilizando quatro pontos de aplicação da carga de 20 kN cada e pressão de contato pneu-pavimento de 0,56 MPa. O eixo simulado deve possuir 32,4 cm de distância entre o centro geométrico de duas rodas e 181,0 cm de distância entre o centro geométrico dos pares de rodas.

Os pontos de análise da estrutura devem ser escolhidos com base na situação mais desfavorável com relação à aplicação da carga, de modo a serem obtidas as situações críticas de deformações, tensões e deslocamentos. Podem ser analisados, a critério da projetista, os pontos localizados nas coordenadas indicadas na Tabela 9, conforme apresenta-se na Figura 2.

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

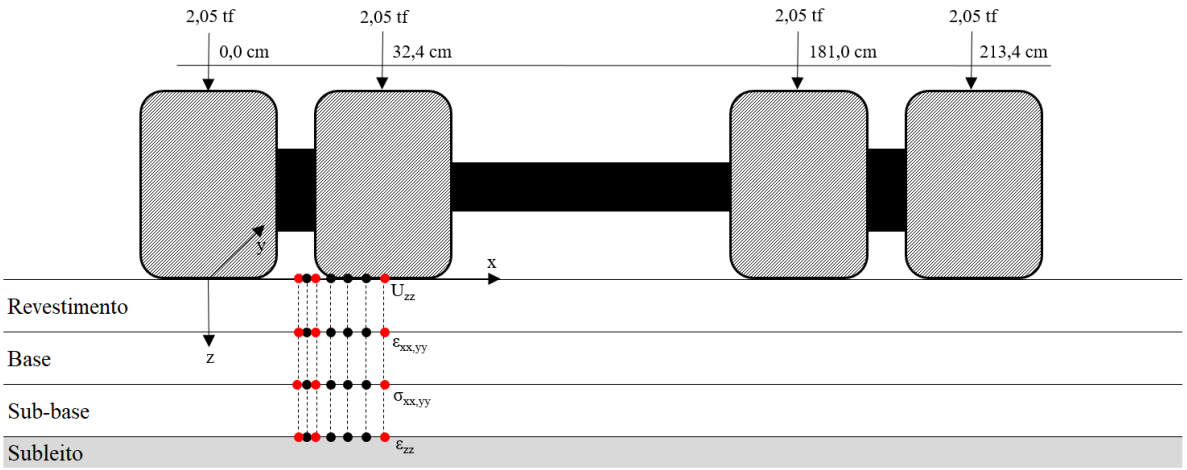

Figura 2: Indicação dos pontos de análise da estrutura

Tabela 9 – Coordenada dos pontos de análise da estrutura

Ponto	Coordenada em cm (x,0,z)
1	x = 16,20
2	x = 18,23
3	x = 20,25
4	x = 23,29
5	x = 26,33
6	x = 29,36
7	x = 32,40

A análise da estrutura deve ser realizada, no mínimo, nos pontos localizados entre duas rodas, na borda carregada e sob uma das rodas internas do eixo (para x igual a 16,20, 20,25 e 32,40 cm, respectivamente).

Nas Tabelas 10 e 11 a seguir, apresentam-se alguns valores recomendados para as propriedades dos materiais de pavimentação.

Tabela 10 – Valores Usuais de Coeficiente de *Poisson*

Material	Intervalo de Valores de Coeficiente de *Poisson*	Valor Recomendado de Coeficiente de *Poisson*
Concreto de cimento *Portland*	0,15 – 0,20	0,15
Misturas asfálticas	0,30 – 0,40	0,30
Materiais granulares	0,30 – 0,40	0,35
Solo cimento e solo melhorado com cimento	0,17 – 0,30	0,25
Brita graduada tratada com cimento e Concreto compactado com rolo	0,20 – 0,25	0,20

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

Material	Intervalo de Valores de Coeficiente de *Poisson*	Valor Recomendado de Coeficiente de *Poisson*
Reciclado com cimento	0,20 – 0,30	0,25
Reciclado com espuma	0,30 – 0,40	0,35
Materiais estabilizados com cal	0,10 – 0,25	0,20
Solos arenosos	0,20 – 0,40	0,30
Areias compactadas	0,30 – 0,45	0,35
Solos finos	0,30 – 0,50	0,40
Argilas moles saturadas	0,40 – 0,50	0,45

Tabela 11 – Valores Usuais de Módulo de Resiliência ou Elasticidade

Material	Intervalos de Valores de Módulo de Resiliência (MPa)
Misturas asfálticas:	
- revestimento (CAP 50-70)	3000 – 6500
- revestimento (CAP 30-45)	2500 – 4500
- revestimento (ligante modificado com polímero)	3500 – 10500
- revestimento (ligante modificado com borracha)	1700 – 6500
- binder (CAP 50-70)	2000 – 3000
- binder (CAP 30-45)	2500 – 4000
- pré-misturado a quente	2000 – 2500
- pré-misturado a frio	1000 – 1400
Materiais granulares:	
- brita graduada sobre camada granular	200 – 380
- brita graduada sobre camada cimentada	350 – 450
- macadame seco	100 – 300
- solo-brita	150 – 350
Materiais estabilizados quimicamente:	
- solo-cimento	400 – 11000
- brita graduada tratada com cimento	7000 – 15000
- reciclado com cimento	4000 – 7000
- reciclado com espuma	800 – 2000
- concreto compactado com rolo	7000 – 29500
Concreto de cimento *Portland*	30000 – 35000
Solos finos em base e sub-base	150 – 300
Solos finos em subleito e reforço do subleito	
- solos de comportamento laterítico LA, LA', LG'	100 – 200
- solos de comportamento não laterítico	25 – 75
Solos finos melhorados com cimento para reforço de subleito	200 – 400

Para os solos do subleito recomendam-se as seguintes correlações entre módulo de resiliência

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

e capacidade de suporte ISC:

- solos lateríticos arenosos (LA') e lateríticos argilosos (LG'):

$$MR = 22 \times ISC^{0,8} \text{ (MPa)}$$

- solos não lateríticos siltosos (NS') e não lateríticos argilosos (NG'):

$$MR = 18 \times ISC^{0,64} \text{ (MPa)}$$

- solos arenosos pouco ou não coesivos:

$$MR = 14 \times ISC^{0,7} \text{ (MPa)}$$

5.4.4.2 Modelos de análise para a verificação mecanicista

Para a análise mecanicista de estrutura de pavimento utilizam-se modelos experimentais de fadiga de materiais. Portanto, é necessário que o projetista tenha conhecimento de diversos modelos publicados em literatura técnica, suas vantagens em relação a outros modelos de fadiga e suas limitações.

Para a adoção de expressões matemáticas de fadiga de materiais constituintes da estrutura do pavimento na avaliação da qualidade e do desempenho de determinado pavimento, é necessário compreender como e em quais condições as expressões matemáticas de fadiga foram obtidas.

Para a verificação mecanicista de estruturas de pavimentos são recomendadas as seguintes equações de fadiga referentes aos materiais revestimento de concreto asfáltico, bases ou sub-bases cimentadas e do subleito.

a) superfície do revestimento

Os deslocamentos verticais recuperáveis de um pavimento representam a resposta das camadas estruturais e do subleito à aplicação do carregamento. Quando uma carga é aplicada em um ponto da superfície do pavimento, todas as camadas fletem devido às tensões e às deformações geradas pelo carregamento, sendo que o valor do deslocamento geralmente diminui com a profundidade e com o distanciamento do ponto de aplicação da carga.

Dessa forma, é conveniente verificar o valor do deslocamento vertical recuperável máximo da superfície do pavimento, comparando-o com o valor de projeto obtido pelas expressões matemáticas do DNER-PRO 011/79[13] ou DNER-PRO 269/94[14], que é função do número "N". Esclareça-se que é comum também denominar o deslocamento vertical recuperável máximo da superfície do pavimento como deflexão.

As expressões matemáticas são do tipo:

$$\log D_{adm} = k - n \times \log N$$

Onde:

N: número equivalente de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN acumulado para o período de projeto;

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

k e *n*: coeficientes determinados por regressões lineares.

Recomenda-se empregar na análise mecanicista de pavimentos flexíveis a equação cujos parâmetros são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Deslocamento Vertical Recuperável em Função do Número "N" para Pavimentos Flexíveis

Equação	Procedimento	K	n
1	DNER-PRO 011/79	3,01	0,176

Para pavimentos semirrígidos, recomenda-se a utilização da equação abaixo, cujos parâmetros são apresentados na Tabela 13.

$$N = k \times D^n$$

Onde:

N: número equivalente de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN acumulado para o período de projeto;

k e *n*: coeficientes determinados por regressões lineares.

Tabela 13 – Deslocamento Vertical Recuperável em Função do Número "N" para Pavimentos Semirrígidos

Equação	Procedimento	Ano	k	n
1	TRRL LR 375	1972	$9{,}314 \times 10^{15}$	-5,6

Deve-se considerar que o número "N" resultante é o obtido pela metodologia da USACE.

b) revestimento de concreto asfáltico

As deformações horizontais de tração, ε_t, nas fibras inferiores das camadas asfálticas, causadas pelos carregamentos na superfície dos pavimentos, podem causar sua ruptura por fadiga se forem excessivas.

Para materiais asfálticos existem dois tipos principais de ensaios: deformação ou tensão controladas. No entanto, qualquer que seja o método de ensaio, vale a seguinte expressão:

$$N = K \times \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^n$$

Onde:

N: número equivalente de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN acumulado para o período de projeto;

ε_t : deformação específica horizontal na tração;

K e n: coeficientes determinados por regressões lineares, particulares para cada tipo

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

de mistura asfáltica e modificados para refletir o desempenho no campo.

Os ensaios de fadiga apresentam grande dispersão dos resultados, particularmente no que diz respeito às misturas asfálticas, devido não só à inerente heterogeneidade do material, como também às técnicas de ensaio de preparação dos corpos de prova, tipos de ensaios etc.

Dentre as inúmeras equações de fadiga desenvolvidas por pesquisadores em estudos nacionais e internacionais, recomenda-se para a camada de revestimento de concreto asfáltico o emprego da expressão matemática cujos parâmetros são indicados na Tabela 14 para a análise mecanicista.

Tabela 14 – Número "N" em Função da Deformação Específica de Tração ε_t da Fibra Inferior da Camada de Concreto Asfáltico

Equação	Autor	Ano	*K*	*n*
1	FHWA (*Federal Highway Administration*)	1976	$1{,}092 \times 10^{-6}$	3,512

Deve-se considerar que o número "N" resultante é o obtido pela metodologia da AASHTO.

As expressões do *Asphalt Institute* encontradas na literatura, assim como qualquer outra, podem ser empregadas desde que as premissas e parâmetros adotados para a utilização do modelo sejam apresentados e previamente aprovados pelo DER/SP.

c) base ou sub-base de solo-cimento

As deformações horizontais de tração, ε_t, ou tensões horizontais de tração, σ_t, na fibra inferior da camada de solo-cimento, causadas pelos carregamentos na superfície dos pavimentos, podem causar sua ruptura por fadiga se forem excessivas. Para a análise mecanicista recomenda-se a utilização da equação de fadiga quanto à flexão de misturas de solo-cimento pesquisadas por Ceratti[15] apresentada a seguir.

$$N = 10^{(SR - A/B)}$$

Onde:

N: número equivalente de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN acumulado para o período de projeto;

SR: relação entre tensões de tração na fibra inferior da camada cimentada (tensão atuante e tensão de ruptura);

A e *B*: coeficientes determinados por regressões lineares, particulares para cada tipo de mistura solo-cimento. Ver Tabela 15.

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

Tabela 15 – Número "N" em Função da Relação de Tensões de Tração na Fibra Inferior da Camada de Solo-Cimento

Equação	Tipo de Solo – Classificação MCT	A	B
1	Areias não lateríticas (NA)	125,63	-14,920
2	Areias lateríticas (LA)	89,86	-3,930
3	Solos arenosos lateríticos (LA')	94,76	- 2,50
4	Solos argilosos lateríticos (LG')	64,01	-0,822

Deve-se considerar que o número "N" resultante é o obtido pela metodologia da USACE.

d) base ou sub-base de brita graduada tratada com cimento

Na camada de base ou sub-base de brita graduada tratada com cimento, ocorre a fadiga de forma idêntica à da camada de solo-cimento. As deformações horizontais de tração, ε_t, ou tensões horizontais de tração, σ_t, na fibra inferior da camada cimentada, causadas pelos carregamentos na superfície dos pavimentos, podem causar sua ruptura por fadiga se forem excessivas. Logo, para a análise mecanicista recomenda-se a equação de fadiga desenvolvida por Balbo[16].

$$\log N = 17{,}1373 - 19{,}6078 \times SR$$

Onde:

N: número equivalente de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN na tensão máxima de tração sob a camada cimentada, σ_t, requerido para se iniciar a primeira trinca por fadiga;

SR: relação entre tensões de tração na fibra inferior da camada cimentada (tensão atuante e tensão de ruptura).

Deve-se considerar que o número "N" resultante é o obtido pela metodologia da USACE.

e) base ou sub-base de concreto compactado com rolo

Em camada de base ou sub-base de concreto compactado com rolo também ocorre a fadiga como em camadas de solo-cimento e brita graduada tratada com cimento. As deformações horizontais de tração, ε_t, ou tensões horizontais de tração, σ_t, na fibra inferior da camada cimentada, causadas pelos carregamentos na superfície dos pavimentos, podem causar sua ruptura por fadiga se forem excessivas. Para a análise mecanicista recomenda-se empregar as equações de fadiga desenvolvidas por Trichês[17].

$$\log N = A - B \times SR$$

Onde:

N: número equivalente de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN na tensão máxima de tração sob a camada cimentada, σ_t, requerido para se

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

iniciar a primeira trinca por fadiga;

SR: relação entre tensões de tração na fibra inferior da camada cimentada (tensão atuante e tensão de ruptura).

A e *B*: coeficientes determinados por regressões lineares, particulares para cada tipo de mistura solo-cimento. Ver Tabela 16.

Tabela 16 – Número "N" em Função da Relação de Tensões de Tração na Fibra Inferior da Camada de Concreto Compactado com Rolo

Equação	Autor	Ano	A	B
1	Trichês (c = 120 kg/m³)*	1993	14,911	15,074
2	Trichês (c = 200 kg/m³)*	1993	14,310	15,518
3	Trichês (c = 280 kg/m³)*	1993	14,704	13,722

*c é o consumo de cimento

Deve-se considerar que o número "N" resultante é o obtido pela metodologia da USACE.

f) base ou sub-base de material reciclado com cimento

O mesmo mecanismo de ruptura ocorre em camada de base ou sub-base de material reciclado com cimento. As deformações horizontais de tração, ε_t, ou tensões horizontais de tração, σ_t, na fibra inferior da camada reciclada com cimento, causadas pelos carregamentos na superfície dos pavimentos, podem causar sua ruptura por fadiga se forem excessivas. Para a análise mecanicista recomenda-se empregar a equação desenvolvida por Minguela[18].

$$\log N = 17{,}2414 - 17{,}2414 \times SR$$

Onde:

N: número equivalente de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN na tensão máxima de tração sob a camada cimentada, σ_t, requerido para se iniciar a primeira trinca por fadiga;

SR: relação entre tensões de tração na fibra inferior da camada cimentada (tensão atuante e tensão de ruptura).

Deve-se considerar que o número "N" resultante é o obtido pela metodologia da USACE.

g) subleito

A análise é realizada por comparação da máxima deformação específica vertical de compressão, ε_v, atuante no topo do subleito, considerando-se sistema de camadas elásticas, com os valores admissíveis.

O critério de fadiga para deformações verticais de compressão do subleito é idêntico aos modelos adotados para a fadiga de misturas asfálticas e expresso por equação do tipo:

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

$$N = K \times \left(\frac{1}{\varepsilon_v} \right)^n$$

Onde:

N: número equivalente de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN acumulado para o período de projeto;

ε_v: deformação específica horizontal na tração;

K e n: coeficientes determinados por regressões lineares, particulares para cada tipo de mistura asfáltica e modificados para refletir o desempenho no campo.

Dentre as inúmeras equações de fadiga para deformações verticais de compressão do subleito desenvolvidas por pesquisadores em estudos nacionais e internacionais, recomenda-se o emprego na análise mecanicista da expressão matemática cujos parâmetros são indicados na Tabela 17.

Tabela 17 – Número "N" em Função da Deformação Específica de Compressão ε_v do Topo da Camada do Subleito

Equação	Autor	Ano	*K*	*n*
1	Dormon & Metcalf	1965	$6{,}069 \times 10^{-10}$	4,762

Deve-se considerar que o número "N" resultante é o obtido pela metodologia da USACE.

5.5 Controle de Aceitação de Obra

No projeto devem ser especificados os valores limitantes de controle de obra para cada camada do pavimento com relação ao controle deflectométrico e para a camada de rolamento com relação à irregularidade e ao atrito.

Para a camada de rolamento, a execução pode sofrer um ajustamento de preço com base no controle de obra. Ajustamentos de preços para pagamento de 100% ou pagamentos reduzidos aplica-se às seções de pavimentos onde a execução da obra resulta em valores maiores aos valores limitantes indicados em projeto e trabalhos corretivos estejam completos.

5.5.1 Controle Deflectométrico de Execução de Camadas

A execução das camadas do pavimento deve atender às especificações técnicas e às espessuras dimensionadas. Para o controle de compactação e integridade das camadas, deve-se realizar o ensaio deflectométrico com a viga *Benkelman*, conforme a norma DNER-ME 024[(19)], a fim de se obter as deflexões máximas no subleito e em cada uma das demais camadas estruturais do pavimento, após o término do processo de compactação. A deflexão na camada de rolamento (final) do pavimento deve ser determinada por meio de equipamento tipo *FWD* (*Falling Weight Deflectometer*), de acordo com a norma DNER-PRO 273[(20)].

Esta etapa não deve ser confundida com as avaliações deflectométricas provenientes do monitoramento do pavimento, efetuadas exclusivamente com o equipamento tipo *FWD*.

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

O projeto deve apresentar obrigatoriamente o controle deflectométrico das camadas inferiores com viga *Benkelman* e da camada de rolamento com *FWD* e viga *Benkelman*. As medidas de deflexão devem ser efetuadas conforme as especificações técnicas de cada camada.

5.5.2 Controle de Irregularidade Longitudinal

A execução da camada de rolamento deve atender ao controle de irregularidade da camada de rolamento, que deve indicar os valores máximos de irregularidade em função da velocidade de operação da via. No projeto executivo de pavimentação deve ser indicado o valor de IRI máximo a ser obtido para a aceitação do serviço.

Para pavimentos recém construídos, a superfície avaliada deve atender aos limites de *International Roughness Index* (IRI) constantes na Tabela 18, adaptados de Yu *et al.*[21].

Tabela 18 – Limites de IRI em função da velocidade de operação

Qualidade ao Rolamento	Limites de IRI para Diferentes Velocidades (em m/km)				
	120 km/h	100 km/h	80 km/h	70 km/h	60 km/h
Muito boa	< 1,50	< 1,80	< 2,25	< 2,70	< 3,00

5.5.3 Controle de Atrito

Para pavimentos asfálticos, o controle de atrito é condicionado às condições de macrotextura e microtextura da camada de rolamento e deve atender aos limites das respectivas especificações técnicas (ET-DE-P00) dos materiais de revestimento. A macrotextura e a microtextura são quantificados por meio dos índices HS (altura de mancha de areia), VRD (valor de resistência a derrapagem), GN (*Grip Number*) e IFI (*International Friction Index*).

5.6 Análise Técnico-Econômica e Ambiental

O tipo de pavimento a ser escolhido deve ser o que apresente melhor benefício técnico-econômico e gerar menor impacto ambiental.

Para a determinação da melhor solução técnica e econômica, deve-se:

- conhecer os materiais disponíveis na região da obra, que poderão ser utilizados no projeto;
- conhecer as características climáticas da região de implantação da obra, as variações máximas e mínimas de temperatura e os índices pluviométricos médios, que poderão afetar a execução da obra e o desempenho dos materiais ao longo do período de projeto;
- conhecer as características de solicitação do tráfego, bem como o crescimento ou sua variação futura;
- conhecer as características dos solos do local e da região da obra e verificar a necessidade da realização de sondagens e ensaios geotécnicos complementares;
- realizar estudos técnico-econômicos visando o máximo aproveitamento dos materiais disponíveis na área;

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

- compatibilizar o projeto de pavimento com os diversos projetos envolvidos;
- utilizar materiais e métodos construtivos compatíveis com as características regionais e demais partes da obra.

Para reduzir o impacto ambiental, pode-se:

- reduzir energia consumida e emissões geradas para a produção dos materiais, com a utilização de combustíveis alternativos para os equipamentos e materiais alternativos que exigem temperaturas de execução menores;
- aumentar a porcentagem de uso de material reciclado;
- aumentar a vida útil dos pavimentos, com a melhora no projeto das misturas, uso de misturas asfálticas modificadas, melhor controle de compactação das camadas, etc.;
- aumentar a eficiência na usina;
- aumentar a qualidade inicial dos materiais de pavimentação;
- usar rejuvenescedores;
- melhorar a qualidade da construção;
- otimizar o uso de materiais reciclados por meio de testes e caracterização;
- processar os materiais *in situ*, que implica em reduções substanciais no consumo de combustível e nas emissões, além de reduções no tráfego e atrasos relacionados.

6 FORMA DE APRESENTAÇÃO

A apresentação dos documentos técnicos do tipo memorial, relatórios e outros elaborados no formato ABNT A-4 deve seguir as instruções descritas na IP-DE-A00/001 de Elaboração e Apresentação de Documentos Técnicos. Os desenhos técnicos devem ser apresentados e elaborados conforme a instrução IP-DE-A00/003 de Elaboração e Apresentação de Desenhos de Projeto em Meio Digital.

A codificação dos documentos técnicos e desenhos deve seguir a instrução de codificação de documentos técnicos IP-DE-A00/002.

6.1 Estudo Preliminar

Deve ser apresentado memorial descritivo indicando os estudos e pesquisas realizadas com relação aos dados disponíveis de geologia e geotecnia, tráfego e, eventualmente, de dados de algum projeto existente na área de influência da obra, bem como as alternativas de pavimento estudadas e a solução eleita a partir de análise técnico-econômica simplificada.

No estudo preliminar, ou anteprojeto, devem ser apresentados estudo de alternativas de estruturas de pavimento acompanhadas de pré-dimensionamentos e a solução eleita a partir de análise técnico-econômica simplificada, desenhos de seção-tipo de pavimento e planilha de quantidades com orçamento preliminar da obra.

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

6.2 Projeto Básico

6.2.1 Relatório de Estudo Geotécnico

Deve ser apresentado o relatório de estudos geológicos e geotécnicos executados, contendo os resultados das sondagens e ensaios laboratoriais e pesquisas de jazidas pedreiras e areais.

6.2.2 Memorial de Cálculo

Deve conter a descrição dos serviços executados, as alternativas de soluções possíveis de pavimentação e a alternativa selecionada pela projetista, todas acompanhadas de justificativas técnico-econômicas, resumo dos resultados de ensaios laboratoriais e de pesquisas realizadas. A estimativa do tráfego deve ser detalhadamente apresentada, indicando as premissas adotadas, taxas de crescimento empregadas e cálculos realizados. Também deve ser apresentado o memorial de cálculo justificativo das soluções desenvolvidas no projeto, com todos os métodos de dimensionamentos realizados, bem como a análise mecanicista da estrutura. Deve conter, ainda, cronograma estimado para implantação do pavimento e planilhas de quantidades com o orçamento da obra.

6.2.3 Desenhos

Devem ser adotadas as seguintes escalas:

- série normal – 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500, 1:25, 1:20;
- série especial – 1:10, 1:5, 1:2, 1:1.

A série especial destina-se à representação de detalhes. A série normal refere-se à apresentação de plantas de localização e seção-tipo transversal.

O projeto básico deve compreender detalhes gerais da obra, contendo, no mínimo:

- plantas de distribuição dos tipos de estruturas de pavimento;
- seções-tipo transversal de pavimento, com todos os detalhes e notas necessárias para a execução adequada dos serviços de pavimentação.

6.2.4 Detalhes Complementares

Devem ser elaboradas planilhas de quantidades e orçamentos de serviços e materiais previstos para a execução da obra. Devem ser respeitadas, sempre que possível, a discriminação e as especificações que constam na Tabela de Preços Unitários – TPU do DER/SP. A TPU vigente deve ser sempre a última publicada anteriormente à entrega do documento final ao DER/SP.

Os serviços previstos que não se enquadrarem naqueles discriminados na TPU devem ser perfeitamente definidos e descritos. Caso necessário, deve ser elaborada Especificação de Serviço para acompanhar o projeto.

Também deve ser apresentado cronograma estimativo para execução da obra.

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

6.3 Projeto Executivo

É o conjunto de documentos, tais como: memorial descritivo, memorial de cálculo, desenhos, especificações e orçamentos, perfeitamente definidos e completos, que tornam possível a perfeita execução da obra.

6.3.1 Memorial Descritivo

Devem conter a descrição dos serviços executados e o detalhamento da alternativa selecionada pela projetista, acompanhada de justificativa técnico-econômica, resultados de ensaios laboratoriais e de pesquisas realizadas. O memorial descritivo deve conter também planilhas de quantidades-conforme modelos apresentados no Anexo D. Dever ser incluído no memorial descritivo o cronograma estimado para implantação do pavimento e o orçamento dos serviços de pavimentação.

6.3.2 Memorial de Cálculo

Deve conter a descrição da solução desenvolvida no projeto, com todos os cálculos de dimensionamentos realizados. Deve ser apresentada, também, a verificação mecanicista da estrutura de pavimento dimensionada.

6.3.3 Desenhos

Devem ser adotadas as seguintes escalas:

- série normal – 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500, 1:25, 1:20;
- série especial – 1:10, 1:5, 1:2, 1:1.

A série especial destina-se à representação de detalhes. A série normal refere-se à apresentação de plantas de localização e seção-tipo transversal.

O projeto executivo deve compreender detalhes gerais da obra, contendo, no mínimo:

- plantas de distribuição dos tipos de estruturas de pavimento. No caso de pavimento rígido, deve conter a apresentação da geometria e tipos de juntas;
- detalhes construtivos de encaixes de pavimento, drenos rasos, lajes de transição, juntas longitudinais e transversais de pavimento rígido etc.;
- seções-tipo transversal de pavimento, com todos os detalhes e notas necessárias para a execução adequada dos serviços de pavimentação.

6.3.4 Detalhes Complementares

Devem ser apresentados os detalhes necessários à boa execução da obra e ao fácil entendimento do projeto.

Deve ser apresentado, também, cronograma estimativo para execução da obra.

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

Na etapa de projeto executivo, com objetivo de auxiliar o controle tecnológico de obra, deve ser apresentada tabela com os valores de deslocamento verticais recuperáveis máximos na superfície de cada camada da estrutura de pavimento nos desenhos de seções-tipo transversais de pavimento.

6.3.5 Planilhas de Quantidade e Orçamento

Na elaboração das planilhas de quantidade e orçamento dos serviços e materiais previstos para a execução da obra, deve-se respeitar, sempre que possível, a discriminação e as especificações que constam na Tabela de Preços Unitários – TPU vigente do DER/SP. A TPU vigente deve ser sempre a última publicada anteriormente à entrega do documento final ao DER/SP.

Os serviços previstos que não se enquadrarem naqueles discriminados na TPU devem ser perfeitamente definidos e descritos. Caso necessário, deve ser elaborada Especificação de Serviço para acompanhar o projeto.

Deve ser apresentada planilha com o memorial de quantificação, elaborada de forma de fácil entendimento para posterior verificação das quantidades previstas para a obra. Recomenda-se que as quantidades sejam indicadas por tipo de intervenção e por atividades de serviços previstos na TPU, segmentando por elementos de obra, tais como: revestimento, imprimação asfáltica ligante, imprimação asfáltica impermeabilizante, base, sub-base, reforço do subleito, melhoria e preparo do subleito etc., indicando comprimento, largura, espessura, área, volume etc.

As áreas podem ser obtidas dos desenhos utilizando os recursos do programa computacional de elaboração do desenho.

6.3.6 Projetos com Materiais Diferentes

A utilização no projeto de qualquer tipo de material não especificado pelas normas brasileiras ou pelo DER/SP somente será admitida mediante autorização prévia e expressa do DER/SP.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1 DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis**. São Paulo, 1986.21 p.

2 DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Manual de Pavimentação – Publicação IP-719**. 3ª edição. Rio de Janeiro, 2006. 274 p.

3 DEPARTAMENTO NACIONAL INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentos Rígidos – Publicação IP-714**. 2ª edição. Rio de Janeiro, 2005. 234 p.

4 AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Guide for Design of Pavement Structures**. Washington, D.C. 1993. 700 p.

5 PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO**. Instruções de Projeto**. São Paulo.

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

2004. 238 p.

6 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9781**. Peças de Concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

7 DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **DER/SP M 196** – Classificação de solos tropicais segundo a metodologia MCT. 1989.

8 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9813**. Solo – Determinação da massa específica aparente in situ, com emprego de cilindro de cravação. Rio de Janeiro, 2016.

9 DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 134-ME.** Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2018. 18p.

10 DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **ET-DE-P00/027.** Especificação Técnica: Concreto asfáltico. São Paulo, 2005. 45p.

11 PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. **Manual Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements**. Ottawa, 1984.

12 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Estudo Técnico ET-13** – Projeto de juntas em pavimentos rodoviários de concreto. São Paulo, 1998. 36 p.

13 DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNER-PRO 011/79 –** Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis – Procedimento "B". Rio de Janeiro, 1979. 16 p.

14 ____. **DNER-PRO 269/94 –** Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis – Tecnapav. Rio de Janeiro, 1994. 17 p.

15 CERATTI, J. A. P. **Estudo do Comportamento à Fadiga de Solos Estabilizados com Cimento**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ. 1991. 314 p.

16 BALBO, J. T. **Estudo das propriedades mecânicas das misturas de brita e cimento e sua aplicação aos pavimentos semi-rígidos**. Tese de Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993. 181 p.

17 TRICHÊS, G. **Concreto compactado a rolo para aplicação em pavimentação: estudo do comportamento na fadiga e proposição de metodologia de dimensionamento**. Tese de Doutorado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, 1993. 365 p.

18 MINGUELA, J. D. **El estudio del comportamiento de los firmes reciclados in situ con cemento**. Tese de Doutorado – Universidad de Burgos. Burgos, 2011. 572 p.

19 DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 024.** Pavimento – determinação das deflexões pela Viga Benkelman. Rio de Janeiro, 1994. 6 p.

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

20 ____. **DNER-PRO 273.** Determinação das deflexões utilizando o deflectômetro de impacto tipo “falling weight deflectometer – FWD”. Rio de Janeiro, 1996. 4p.

21 YU J.; CHOU E.Y.J.; YAU J.T. **Development of Speed-Related Ride Quality Thresholds Using International Roughness Index.** Transportation Research Record. 2006;1974(1):47-53. doi:10.1177/0361198106197400106.

/ANEXO A

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

MINUTA

ANEXO A – VALORES DO PERCENTUAL $t_{0,90}$ EM FUNÇÃO DOS VALORES *n-1*

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

Tabela A-1 – Valores do Porcentual $t_{0,90}$ em Função dos Valores n-1

n – 1	$t_{0,90}$	n – 1	$t_{0,90}$	n – 1	$t_{0,90}$	n – 1	$t_{0,90}$
1	3,08	11	1,36	21	1,32	40	1,30
2	1,89	12	1,36	22	1,32	60	1,30
3	1,64	13	1,35	23	1,32	120	1,29
4	1,53	14	1,34	24	1,32	∞	1,28
5	1,48	15	1,34	25	1,32		
6	1,44	16	1,34	26	1,32		
7	1,42	17	1,33	27	1,31		
8	1,40	18	1,33	28	1,31		
9	1,38	19	1,33	29	1,31		
10	1,37	20	1,32	30	1,31		

/ANEXO B

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

MINUTA

ANEXO B – EXEMPLOS DE PLANILHAS DE CÁLCULO DE NÚMERO “N”

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

DETERMINAÇÃO DO NÚMERO "N" DE SOLICITAÇÕES DO EIXO SIMPLES PADRÃO - USACE E AASHTO

Projeto: _____
Trecho: _____

- Volume Diário Médio Unidirecional =>	1.500
- % de veíc. direcional =>	100%
- % de veíc. com. na faixa solicitada =>	100%
- fator climático regional =>	1,0
- taxas de crescimento tráfego =>	3,0%
- período de projeto (anos) =>	10

Classe	Nº de Eixos				Volume Diário Médio	Freq (%)	FV individual (USACE)		FVi*Freq (USACE)		FV frota	FV individual (AASHTO)		FVi*Freq (AASHTO)		FV frota
	Simples (roda simples)	Simples (roda dupla)	Tandem duplo (roda dupla)	Tandem triplo (roda dupla)			Vazio	CML	Vazio	CML	(USACE)	Vazio	CML	Vazio	CML	(AASHTO)
2C	1	1			690	46,00%	0,151	3,567	0,017	1,231	1,248	0,136	2,722	0,016	0,939	0,955
3C	1		1		510	34,00%	0,097	8,827	0,008	2,251	2,259	0,038	1,970	0,003	0,502	0,506
2S1	1	2			15	1,00%	0,284	6,857	0,001	0,051	0,052	0,256	5,116	0,001	0,038	0,039
2S2	1	1	1		45	3,00%	0,231	12,116	0,002	0,273	0,274	0,158	4,364	0,001	0,098	0,099
2S3	1	1		1	105	7,00%	0,279	12,867	0,005	0,676	0,680	0,156	4,282	0,003	0,225	0,228
3S3	1		1	1	52,5	3,50%	0,225	18,127	0,002	0,476	0,478	0,058	3,530	0,001	0,093	0,093
3D4	1		3		45	3,00%	0,257	25,924	0,002	0,583	0,585	0,082	5,255	0,001	0,118	0,119
3D6	1		4		15	1,00%	0,338	34,473	0,001	0,259	0,259	0,104	6,897	0,000	0,052	0,052
3T6	1		4		22,5	1,50%	0,338	34,473	0,001	0,388	0,389	0,104	6,897	0,000	0,078	0,078
					1.500	100,00%					6,226					2,168

N_{USACE} = 3,91E+07 solicitações do eixo padrão

N_{AASHTO} = 1,36E+07 solicitações do eixo padrão

VDM_0	1.500
VDMt	17196

Condição	%
Vazio	25%
CML	75%

Tipo	Peso (tf)		FEO (USACE)		FEO (AASHTO)	
	Vazio	CML	Vazio	CML	Vazio	CML
ESRS	3	6,0	0,017	0,278	0,016	0,327
ESRD	5	10,0	0,134	3,289	0,120	2,394
ETD	6	17,0	0,080	8,549	0,022	1,642
ETT	9	25,5	0,128	9,300	0,019	1,560

Figura B-1 – Modelo de Planilha de Determinação do Número "N"– USACE e AASHTO

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

Projeto: _____
Trecho: _____

- Volume Médio Diário Bidirecional
- % de distribuição direcional =>
- % de veículos comerciais na faixa solicitada =>
- fator climático regional =>
- taxa de crescimento anual =>

D	50%
Fp	100%
FR	1
Tca	2%

Ano	VDM - Veículos Comerciais										
	2C	3C	3CD	2S1	2S2	2S3	3S3	3D4	3D6	Ônibus 2C	Ônibus 3CB
1	264	254	109	0	29	62	2	0	0	66	2
2	269	259	111	0	30	63	2	0	0	67	2
3	275	264	113	0	30	65	2	0	0	69	2
4	280	270	116	0	31	66	2	0	0	70	2
5	286	275	118	0	31	67	2	0	0	71	2
6	291	280	120	0	32	68	2	0	0	73	2
7	297	286	123	0	33	70	2	0	0	74	2
8	303	292	125	0	33	71	2	0	0	76	2
9	309	298	128	0	34	73	2	0	0	77	2
10	316	304	130	0	35	74	2	0	0	79	2
11	322	310	133	0	35	76	2	0	0	80	2
12	328	316	136	0	36	77	2	0	0	82	2
13	335	322	138	0	37	79	3	0	0	84	3
14	342	329	141	0	38	80	3	0	0	85	3
15	348	335	144	0	38	82	3	0	0	87	3
16	355	342	147	0	39	83	3	0	0	89	3
17	362	349	150	0	40	85	3	0	0	91	3
18	370	356	153	0	41	87	3	0	0	92	3
19	377	363	156	0	41	89	3	0	0	94	3
20	385	370	159	0	42	90	3	0	0	96	3
Total Anual Acumulado na Faixa de Projeto	1,17E+06	1,13E+06	4,83E+05	0,00E+00	1,29E+05	2,75E+05	8,87E+03	0,00E+00	0,00E+00	2,93E+05	8,87E+03

Vti = VDM x 365 x D x Fp

Tipo de Eixo	**ESRS**	1,17E+06	1,13E+06	4,83E+05	0,00E+00	1,29E+05	2,75E+05	8,87E+03	0,00E+00	0,00E+00	2,93E+05	8,87E+03
	ESRD	1,17E+06	-	-	0,00E+00	1,29E+05	2,75E+05	-	-	-	2,93E+05	-
	ETD	-	1,13E+06	4,83E+05	-	1,29E+05	-	8,87E+03	0,00E+00	0,00E+00	-	8,87E+03
	ETT	-	-	-	-	-	-	8,87E+03	-	-	-	-

Tipo de Eixo	Carregamento		Distribuição	N° de repetições previstas
	Condição	Carga (t)		
ESRS	Vazio	3,0	10%	349.421
	75% CML	4,5	20%	698.841
	100% CML	6,0	40%	1.397.682
	110% CML	6,6	30%	1.048.262
ESRD	Vazio	5,0	10%	186.683
	75% CML	7,5	20%	373.366
	100% CML	10,0	40%	746.732
	110% CML	11,0	30%	560.049
ETD	Vazio	6,0	10%	175.598
	75% CML	12,8	20%	351.195
	100% CML	17,0	40%	702.389
	110% CML	18,7	30%	526.792
ETT	Vazio	9,0	10%	887
	75% CML	19,1	20%	1.774
	100% CML	25,5	40%	3.548
	110% CML	28,1	30%	2.661

Figura B-2 – Modelo de Planilha de Determinação do Número "N"– PCA

_____

/ANEXO C

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

MINUTA

ANEXO C – EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA VERIFICAÇÃO MECANICISTA COM MÉTODO DE ROSENBLUETH

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

Tabela C-1 – Estrutura de exemplo para verificação mecanicista, incluindo a variabilidade dos parâmetros

Camada	Espessura – Esp. (cm)	Módulo de Resiliência – MR (kgf/cm²)	Coeficiente de Poisson	Coeficiente de Variação do MR
CBUQ	12,5	35000	0,30	15%
Base em BGS	15	2500	0,35	15%
Macadame Seco	20	1500	0,35	15%
Subleito	-	1000	0,40	15%

Número de termos pelo método Rosenblueth: $2^n = 2^4 = 16$ termos.

Tabela C-2 – Termos do método Rosenblueth para verificação mecanicista da estrutura de exemplo (módulos em kgf/cm² e espessuras em cm)

Termo	MR - Subleito	Esp. - Macadame Seco	MR - Macadame Seco	Esp. - Brita Graduada Simples	MR. - Brita Graduada Simples	Esp. - CBUQ	MR - CBUQ
1	1150	20	1725	15	2875	12,5	40250
2	1150	20	1725	15	2875	12,5	29750
3	1150	20	1725	15	2125	12,5	40250
4	1150	20	1725	15	2125	12,5	29750
5	1150	20	1275	15	2875	12,5	40250
6	1150	20	1275	15	2875	12,5	29750
7	1150	20	1275	15	2125	12,5	40250
8	1150	20	1275	15	2125	12,5	29750
9	850	20	1725	15	2875	12,5	40250
10	850	20	1725	15	2875	12,5	29750
11	850	20	1725	15	2125	12,5	40250
12	850	20	1725	15	2125	12,5	29750
13	850	20	1275	15	2875	12,5	40250
14	850	20	1275	15	2875	12,5	29750
15	850	20	1275	15	2125	12,5	40250
16	850	20	1275	15	2125	12,5	29750

/ANEXO D

MINUTA

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

MINUTA

ANEXO D – MODELOS DE PLANILHAS DE QUANTIDADES DOS SERVIÇOS DE PAVIMENTAÇÃO

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

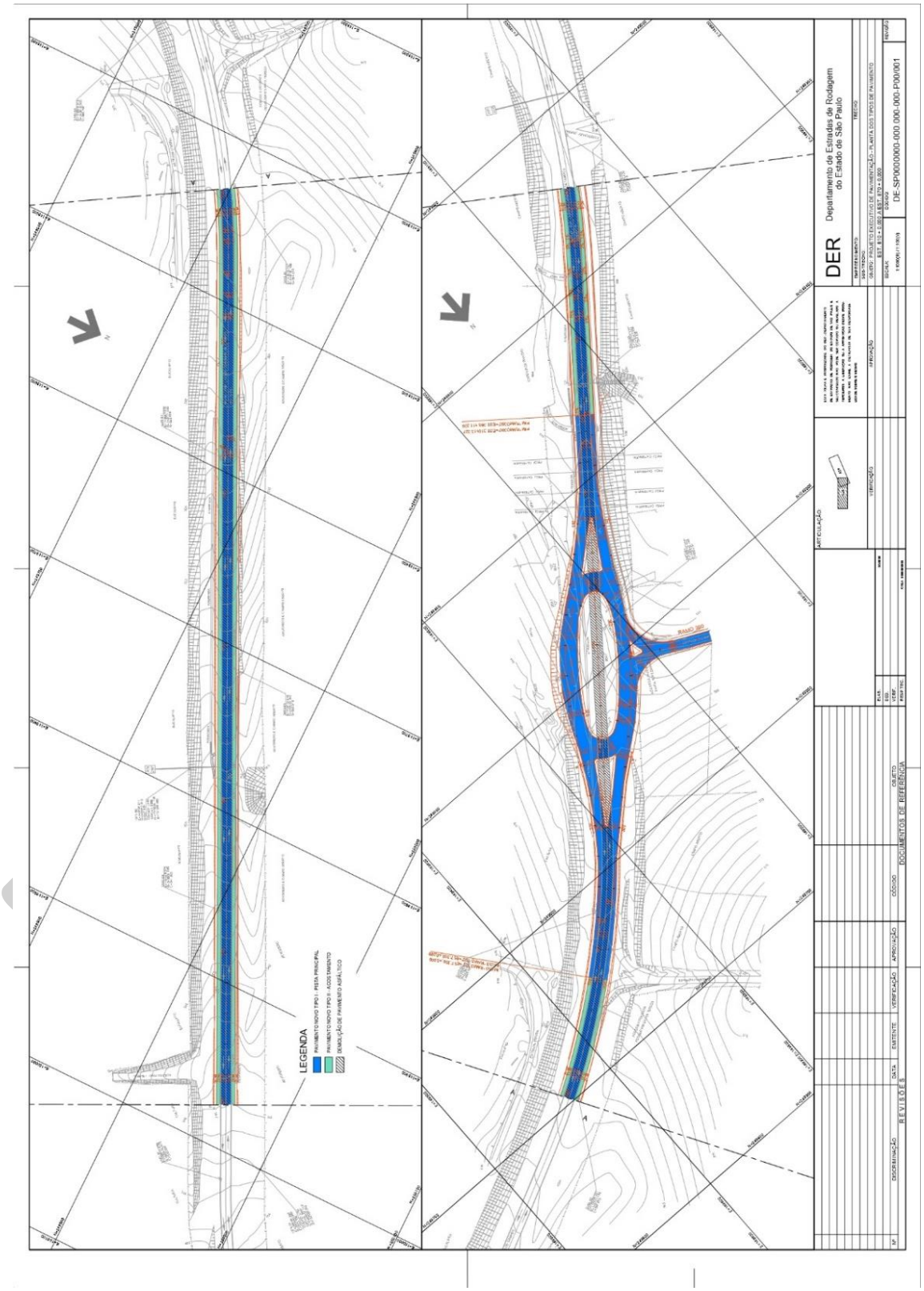

Figura D-1 – Modelo de Planta de Localização de Pavimento

Tabela D-1 – Modelo de Planilha de Quantidades – Distribuição de Soluções por Estacas

Solução de Projeto	Local	Entre Estacas				Extensão (m)	Largura (m)	Área Total (m^2)
		Inicial		Final				
		Int.	Frac.	Int.	Frac.			
PAVIMENTO NOVO TIPO I - PISTA PRINCIPAL	Pista	810	0,000	844	0,000	680,00	7,00	4.760,00
PAVIMENTO NOVO TIPO II - ACOSTAMENTO	Acostamento - LE	810	0,000	844	0,000	680,00	2,50	1.700,00
PAVIMENTO NOVO TIPO II - ACOSTAMENTO	Acostamento - LD	810	0,000	844	0,000	680,00	2,50	1.700,00
DEMOLIÇÃO DE PAVIMENTO	Pista	810	0,000	844	0,000	680,00	var.	4.930,97
PAVIMENTO NOVO TIPO I - PISTA PRINCIPAL	Dispositivo	844	0,000	862	10,600	370,60	var.	6.635,71
PAVIMENTO NOVO TIPO I - PISTA PRINCIPAL	Pista	862	10,600	870	0,000	149,40	7,00	1.045,80
PAVIMENTO NOVO TIPO II - ACOSTAMENTO	Acostamento - LE	862	10,600	870	0,000	149,40	2,50	373,50
PAVIMENTO NOVO TIPO II - ACOSTAMENTO	Acostamento - LD	862	10,600	870	0,000	149,40	2,50	373,50
DEMOLIÇÃO DE PAVIMENTO	Pista	862	10,600	870	0,000	149,40	var.	1.043,76

Tabela D-2 – Quadro Resumo por Soluções

Solução de Projeto	Local	Área (m^2)	Área Total (m^2)
PAVIMENTO NOVO TIPO I - PISTA PRINCIPAL	Pista	5.805,80	12.441,51
PAVIMENTO NOVO TIPO I - PISTA PRINCIPAL	Dispositivo	6.635,71	
PAVIMENTO NOVO TIPO II - ACOSTAMENTO	Acostamento - LE	2.073,50	4.147,00
PAVIMENTO NOVO TIPO II - ACOSTAMENTO	Acostamento - LD	2.073,50	
DEMOLIÇÃO DE PAVIMENTO	Pista	5.974,73	11.949,46
DEMOLIÇÃO DE PAVIMENTO	Pista	5.974,73	

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.

Tabela D-3 – Quadro Resumo por Estrutura - PAVIMENTO NOVO TIPO I - PISTA PRINCIPAL

Item	Descrição	Und.	Coef. Sobr.	Área (m²)	Esp. (m)	Quant.
23.08.03.03	CAMADA ROLAMENTO - CBUQ - GRAD.C - COM DOP	m³	1,01	12441,51	0,06	752,89
23.05.02	IMPRIMADURA BETUMINOSA LIGANTE	m²	1,03	12441,51	-	12832,53
23.05.01	IMPRIMADURA BETUMINOSA IMPERMEABILIZANTE	m³	1,03	12441,51	-	12832,53
23.04.03.01	SUB-BASE OU BASE BRITA GRAD. SIMPLES	m³	1,05	12441,51	0,16	2098,71
23.02.02	MELH/PREPARO SUB-LEITO - 100% EI	m²	1,08	12441,51	-	13401,28

Tabela D-4 – Quadro Resumo por Estrutura - PAVIMENTO NOVO TIPO II - ACOSTAMENTO

Item	Descrição	Und.	Coef. Sobr.	Área (m²)	Esp. (m)	Quant.
23.06.02	TRATAMENTO SUPERFICIAL DUPLO	m³	1,00	4147	0,02	83,27
23.04.03.01	SUB-BASE OU BASE BRITA GRAD. SIMPLES	m²	1,11	4147	0,20	918,98
23.02.02	MELH/PREPARO SUB-LEITO - 100% EI	m³	1,15	4147	-	4760,76

Tabela D-5 – Quadro Resumo por Estrutura - DEMOLIÇÃO DE PAVIMENTO

Item	Descrição	Und.	Coef. Sobr.	Área (m²)	Esp. (m)	Quant.
21.05.07	DEMOLICAO PAVIMENTOFLEXIVEL C/TRANSPORT	m3	1,00	11949,46	0,05	597,47
22.02.09	ESPALHAMENTO/REGULARIZACAO/COMPACTACAO DE MATERIAL EM BOTA-FORA.	m3	1,00	11949,46	-	11949,46
21.05.07	DEMOLICAO PAVIMENTOFLEXIVEL C/TRANSPORT	m3	1,00	11949,46	0,05	597,47

Tabela D-6 – Quadro Resumo Geral

Item	Descrição	Unidade	Quantidades
23.08.03.03	CAMADA ROLAMENTO - CBUQ - GRAD.C - COM DOP	m3	752,89
23.05.02	IMPRIMADURA BETUMINOSA LIGANTE	m2	12.832,53
23.05.01	IMPRIMADURA BETUMINOSA IMPERMEABILIZANTE	m2	12.832,53
23.04.03.01	SUB-BASE OU BASE BRITA GRAD. SIMPLES	m3	3.017,68
23.02.02	MELH/PREPARO SUB-LEITO - 100% EI	m2	18.162,04
23.06.02	TRATAMENTO SUPERFICIAL DUPLO	m3	83,27
21.05.07	DEMOLICAO PAVIMENTOFLEXIVEL C/TRANSPORT	m3	597,47
22.02.09	ESPALHAMENTO/REGULARIZACAO/COMPACTACAO DE MATERIAL EM BOTA-FORA.	m3	11.949,46

Esta folha é de propriedade do DER/SP e seu conteúdo não pode ser copiado ou revelado a terceiros. A aprovação deste documento não exime o Emitente de sua responsabilidade.