

RELATÓRIO DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO TIPO TSD

Obra: TERRAPLENAGEM E DRENAGEM DE RUAS NO PERÍMETRO URBANO.
Local: Conforme projeto, RECURSOLÂNDIA/TO.
PROP: Prefeitura Municipal de Recursolândia – TO.

➤ **PARAMETROS TÉCNICOS**

Os parâmetros e diretrizes fundamentais para o **dimensionamento de pavimentos flexíveis com revestimento em Tratamento Superficial Duplo (TSD)**, uma solução asfáltica por película amplamente utilizada em rodovias de menor volume de tráfego em vias urbanas pelo seu excelente custo-benefício.

1. O Revestimento por TSD (Tratamento Superficial Duplo)

O TSD é um revestimento flexível de pequena espessura (geralmente entre 2,0 cm e 2,5 cm), executado por espalhamentos sucessivos de ligante asfáltico (geralmente emulsão asfáltica modificada por polímero) e agregados minerais britados com granulometrias decrescentes, seguido de compactação.

Como não possui função estrutural expressiva, sua principal finalidade é impermeabilizar a base, proteger a estrutura contra o desgaste do tráfego e fornecer aderência (rugosidade) segura para os veículos.

2. Parâmetros Técnicos de Dimensionamento

A. Capacidade de Carga do Subleito (CBR)

O **CBR (California Bearing Ratio)**, ou Índice de Suporte Califórnia (ISC), associado à **Expansão (E)** do solo, determina a necessidade de reforço da fundação do pavimento.

- **CBR < 5% (Subleito Inadequado):** Exige a substituição do solo ou a execução de uma camada de **reforço do subleito** com material de melhor capacidade de carga.
- **5% ≤ CBR < 10% (Subleito Regular):** Exige camadas de sub-base e base bem dimensionadas para evitar deformações plásticas na superfície (trilhas de roda).
- **CBR ≥ 10% (Subleito Bom):** Permite a redução ou até a eliminação da camada de sub-base.
- **Expansão:** O solo do subleito deve apresentar expansão ≤ **2%** sob inundação.

B. Volume de Tráfego (O Número N)

O TSD é tecnicamente indicado para vias de **tráfego baixo a meio-baixo**. O dimensionamento estrutural baseia-se no **Número N**, que representa o número equivalente de operações de um eixo rodoviário padrão (8,2 toneladas) ao longo do período de projeto.

- **Limite Recomendado:** O TSD atende perfeitamente a tráfegos onde $N \leq 10^6$ (até 1 milhão de repetições do eixo padrão).
- Se o tráfego calculado for pesado ($N > 10^6$), o TSD torna-se suscetível a defeitos precoces como exsudação (subida do asfalto) ou arrancamento de pedriscos, sendo recomendada a substituição por CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente).

3. Método de Dimensionamento Adotado

O método oficial e mais empregado no Brasil para esse tipo de pavimento é o **Método Empírico do DNER (atual DNIT)**, baseado nos conceitos de Peltier e nos ensaios da AASHO.

Etapas do Cálculo Estrutural

1. **Definição do Período de Projeto (V):** Geralmente adota-se um horizonte de **10 anos** para o dimensionamento de TSD.
2. **Cálculo do Número N:** Obtido através de estudos de tráfego, considerando o Volume Diário Médio (VDM), a porcentagem de veículos comerciais (caminhões e ônibus), o fator de carga e a taxa de crescimento anual da frota.
3. **Determinação da Espessura Equivalente de Granular (H_m):** A espessura total necessária de material granular para proteger o subleito é dada pela fórmula empírica do DNIT:

$$H_m = 77 \cdot N^{0,04} \cdot CBR^{-0,30}$$

4. **Cálculo das Camadas Estruturais (Base e Sub-base):**

A estrutura deve satisfazer a inequação de proteção das camadas inferiores através dos coeficientes de equivalência estrutural (K):

$$E_{base} \cdot K_{base} + E_{sub-base} \cdot K_{sub} \geq H_m$$

- Como o TSD é muito delgado, o método do DNIT atribui a ele um coeficiente estrutural nulo ou adota-se $K_{revestimento} = 1,0$ apenas para

a espessura equivalente, delegando o suporte do pavimento inteiramente às camadas de **Base** e **Sub-base**.

- Para materiais granulares comuns (brita graduada, solo-brita), adota-se $K = 1,0$.

4. Configuração Típica da Estrutura

Para um cenário padrão com solo de subleito médio (**CBR = 6%**) e tráfego leve (**N = 5.10⁵**), a estrutura típica resultante do dimensionamento apresenta a seguinte composição:

Camada	Material Requerido	Parâmetros Técnicos	Espessura Mínima
Revestimento	Tratamento Superficial Duplo (TSD)	Emulsão RR-2C ou modificada por Polímero	~2,0 cm a 2,5 cm
Pintura	Imprimação Impermeabilizante	Asfalto Diluído CM-30 ou Emulsão equivalente	-
Base	Brita Graduada Simples (BGS) ou Solo-Brita	CBR ≥ 80%; Expansão ≤ 0,5%	15 cm
Sub-base	Solo selecionado ou mistura granulométrica	CBR ≥ 20%; Expansão ≤ 1,0%	15 cm
Subleito	Solo natural regularizado	CBR ≥ 5%; Expansão ≤ 2,0%	-

5. Fatores Críticos para o Sucesso do TSD

- **Qualidade da Base:** Como o TSD copia as irregularidades da base e não possui rigidez própria, a camada de base deve estar perfeitamente nivelada, compactada e apresentar rigidez elevada (**CBR ≥ 80%**).

- **Drenagem:** A água é o maior inimigo do TSD. Sistemas de drenagem superficial (canaletas, sarjetas e bueiros) devem impedir o acúmulo de água sobre o pavimento ou a infiltração lateral que possa amolecer a base.

➤ **ESTUDO DE VIDA ÚTIL DA ESTRUTURA DE PAVIMENTO FLEXÍVEL (TSD)**

O estudo analítico da vida útil de projeto (VUP) das camadas estruturais (**base e sub-base**) de um pavimento flexível revestido com **Tratamento Superficial Duplo (TSD)**. O objetivo é avaliar os mecanismos de degradação ao longo do tempo e estimar a durabilidade da estrutura sob fadiga e deformação permanente.

1. Premissas Estruturais e de Tráfego

Para a modelagem da vida útil, considera-se uma estrutura padrão dimensionada pelo método do DNIT, sob um regime de tráfego baixo a moderado.

- **Revestimento:** Tratamento Superficial Duplo (TSD) 2,0 cm (função selante e de rolamento, rigidez estrutural desprezível).
- **Base:** Brita Graduada Simples (BGS) de 15 cm (CBR $\geq$ 80%).
- **Sub-base:** Solo selecionado de 20 cm (CBR $\geq$ 20%).
- **Subleito:** Solo natural regularizado (CBR = 6%).
- **Tráfego de Projeto (\$N\$):** $4,5 \cdot 10^5$ repetições do eixo padrão de 8,2 t para um horizonte inicial de **10 anos**.

2. Mecanismos de Degradação da Estrutura (Base e Sub-base)

Ao contrário dos pavimentos com revestimentos asfálticos espessos (como o CBUQ), onde a fadiga do revestimento é o principal limitador, no pavimento com TSD a vida útil da estrutura é governada quase inteiramente pelas camadas granulares e pelo subleito.

2.1. Deformação Permanente (Afundamento em Trilha de Roda - ATR)

É o principal mecanismo de falha estrutural. Sob a repetição de cargas pesadas, ocorrem microdeformações plásticas (não elásticas) cumulativas na base, sub-base e topo do subleito.

- **Na Base e Sub-base:** Ocorre por acomodação dos grãos, quebra de arestas dos agregados ou compactação secundária sob o tráfego.
- **No Subleito:** Ocorre se as tensões verticais que chegam até ele forem superiores à sua capacidade de resiliência, gerando o afundamento espelhado na superfície.

2.2. Degradação por Infiltração e Perda de Suporte (Fator Hidrológico)

Como o TSD é um revestimento muito delgado, a sua vida útil estrutural está intimamente ligada à sua integridade superficial. Se o TSD trincar ou sofrer arrancamento de agregados:

1. A água da chuva infiltra diretamente na **base granular**.
2. Ocorre o aumento da pressão da água nos poros (*poropressão*) sob a passagem dos pneus.
3. Há a lavagem de finos da base e sub-base, reduzindo drasticamente o *CBR* efetivo dessas camadas e acelerando a ruína da estrutura.

3. Avaliação da Vida Útil via Mecânica dos Pavimentos

Para prever a vida útil real antes que o pavimento atinja o estado de **serventia terminal** (IPR - Índice de Serventia do Pavimento inadequado), utiliza-se a análise mecanístico-empírica baseada nas tensões e deformações atuantes.

3.1. Modelo de Previsão de Deformação Vertical (ϵ_v)

A vida útil relacionada ao afundamento por trilha de roda (N_{ATR}) é calculada limitando-se a deformação específica de compressão no topo do subleito (ϵ_v), obtida por softwares de retroanálise (como o *AEMC* ou *MeDiNa*):

$$N_{ATR} = f_1 \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_v} \right)^{f_2}$$

Onde f_1 e f_2 são coeficientes de calibração empírica do solo local (DNIT).

Se a espessura combinada da base (15 cm) e sub-base (20 cm) mantiver a deflexão vertical do subleito abaixo do limite crítico microestrutural, a estrutura cumpre o ciclo de **10 anos** mantendo o ATR acumulado abaixo do limite tolerável de 10mm a 12mm.

4. Curva de Evolução do Estado do Pavimento (Ciclo de Vida)

A perda de qualidade da estrutura não é linear. Ela segue o comportamento clássico de degradação de pavimentos flexíveis de baixo custo:

- Condição do Pavimento (Excelente a Péssimo):

Fase I: Consolidação (Anos 1 a 3): Pequenos ajustes, ATR inicial estável.

Fase II: Desgaste Lento (Anos 4 a 7): Fadiga imperceptível nas camadas granulares.

Fase III: Degradação Acelerada (Anos 8 a 10+): Surgem trincas no TSD -> Infiltração -> Ruína da Base.

- **Anos 1 a 3:** Período de consolidação pós-obra. O tráfego acomoda os agregados da base. O pavimento mantém ótima serventia.
- **Anos 4 a 7:** Fase de estabilidade. O desgaste ocorre de forma lenta e interna nas camadas de base e sub-base, desde que o sistema de drenagem permaneça operável.
- **Anos 8 a 10 (Fim da Vida Útil de Projeto):** O TSD começa a envelhecer e ressecar (oxidação do ligante asfáltico). O aparecimento de trincas mapeadas permite a entrada de água, iniciando a desestruturação rápida da base (brita) e sub-base.

5. Diretrizes para Extensão da Vida Útil (Manutenção)

Para que a estrutura de base e sub-base ultrapasse o horizonte de 10 anos sem necessidade de reconstrução (reestabilização profunda), as seguintes ações de gerência de pavimentos devem ser adotadas:

1. **Banho de Névoa (Fog Seal) no Ano 4 ou 5:** Aplicação de uma leve película de emulsão asfáltica fluida sobre o TSD para rejuvenescer o ligante oxidado e fechar microfissuras, impedindo a entrada de água na base.
2. **Recapeamento por TSD ou Microrevestimento no Ano 7:** A aplicação de uma nova camada esbelta antes do colapso da base renova a impermeabilização e estende a vida útil estrutural por mais 5 a 7 anos.
3. **Manutenção Rígida da Drenagem:** Limpeza semestral de sarjetas, valetas e saídas de bueiros para evitar o empoçamento lateral, protegendo o subleito contra a perda abrupta de CBR por saturação.

Recursolândia – TO, 26 de agosto de 2026.

DANILO
RODRIGUES
ANDRADE:02055
834150

Assinado de forma digital
por DANILO RODRIGUES
ANDRADE:02055834150
Dados: 2026.08.26
10:15:44 -03'00'

Daniilo Rodrigues Andrade
Engenheiro Civil
CREA: 320.356/D-TO