

# DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS NO MÉXICO: MÉTODO EMPÍRICO-MECANICISTA DA SHELL VS CATÁLOGOS LOCAIS

Maria José Almeida<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Mota-Engil Engenharia e Construção S.A., Engenharia Rodoviária, Rua do Rego Lameiro 38, 4300-454 Porto, Porto, Portugal

E-mail: [maria.g.almeida@mota-engil.pt](mailto:maria.g.almeida@mota-engil.pt)

João Afonso<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Mota-Engil Engenharia e Construção S.A., Engenharia Rodoviária, Rua do Rego Lameiro 38, 4300-454 Porto, Porto, Portugal

## RESUMO

*Utilizando a metodologia empírico-mecanicista da Shell e tendo em conta diversos fatores, como o tráfego previsto, as condições climáticas e as condições de fundação, é possível dimensionar a estrutura do pavimento de uma determinada área, nomeadamente no México.*

*O objetivo deste trabalho é comparar os resultados obtidos através do dimensionamento de pavimentos na Cidade do México tendo como base a utilização de expressões e ábacos provenientes do método da Shell, e a utilização de catálogos locais. Fez-se um estudo paramétrico, definindo dados de entrada para os cálculos, concretizando o dimensionamento das estruturas de pavimento na Cidade do México.*

*No final, será possível perceber a adequabilidade dos catálogos locais e avaliar a aplicabilidade da metodologia da Shell no dimensionamento de pavimentos no México.*

**Palavras-chave:** Dimensionamento, pavimento, catálogo, metodologia da Shell, México.

## 1. Introdução

O México, com a sua vasta extensão territorial e diversidade climática, possui uma rede rodoviária crucial para o transporte de mercadorias e pessoas, tendo um impacto direto na economia e no quotidiano da sua população. As condições climáticas variáveis, o tráfego crescente e as diferentes características geotécnicas do solo, exigem soluções de dimensionamento de pavimentos que se adaptem às especificidades de cada região. Assim, é fundamental a utilização de métodos de dimensionamento adequados para garantir pavimentos com bom desempenho e durabilidade.

A metodologia de dimensionamento adotada neste estudo, que também é amplamente utilizada por engenheiros na Europa, é baseada em fórmulas e tabelas do Shell Pavement Design Manual (SHELL, 1978), desenvolvido pela Shell International Petroleum Company Limited. Trata-se de um modelo empírico-mecanicista, voltado principalmente para o dimensionamento de pavimentos flexíveis e semirrígidos.

Além da metodologia da Shell, este estudo também analisa o Catálogo de Secciones Estructurales de Pavimentos para las Carreteras de la República Mexicana (SCT, 2012), um catálogo de dimensionamento de pavimentos utilizado no México e baseado na metodologia do Instituto de Engenharia da UNAM (Universidade Autónoma do México) (Corro et al., 1999) e da AASHTO'93 (AASHTO, 1993).

Assim, este trabalho tem como objetivo avaliar a aplicabilidade da metodologia da Shell no México, mais especificamente na Cidade do México, comparando os resultados de dimensionamento de pavimentos obtidos com este método, com o apoio do software ALIZE™, e os resultados presentes no Catálogo de Secciones Estructurales de Pavimentos para las Carreteras de la República Mexicana. Através desta comparação, pretende-se verificar se a metodologia da Shell é adequada para as condições locais e analisar as diferenças em relação às práticas estabelecidas nos catálogos mexicanos.

## 2. Dados arbitrados para o dimensionamento das estruturas

O presente trabalho foi replicado para três tipos de estruturas diferentes. A primeira estrutura é um pavimento flexível comum, composto por misturas betuminosas em camadas de desgaste e ligação e camadas granulares em camadas de base e sub-base. O segundo trata-se também de um pavimento flexível, mas cuja camada de base é também composta por materiais ligados com ligantes betuminosos. O terceiro é um pavimento semirrígido com misturas betuminosas e camadas granulares sobre uma camada de solo-cimento. Cada tipologia de estrutura foi dimensionada para diferentes condições de tráfego presentes no catálogo de dimensionamento de pavimentos no México (SCT, 2012). Assim sendo, as diferentes condições de tráfego foram classificadas tal como apresentado na tabela 1.

Tabela 1- Condições de tráfego

Intervalos de tráfego				
T1	T2	T3	T4	T5
$\Sigma EE1 \leq 10\,000\,000$	$10\,000\,000 < \Sigma EE2 \leq 20\,000\,000$	$20\,000\,000 < \Sigma EE3 \leq 40\,000\,000$	$40\,000\,000 < \Sigma EE4 \leq 80\,000\,000$	$\Sigma EE5 > 80\,000\,000$

Para este projeto foram utilizadas misturas betuminosas convencionais e usuais em Portugal, de maneira a simplificar a comparação das estruturas. O Caderno de Encargos Tipo Obra (CETO) da Estradas de Portugal (EP, 2009) foi usado como base para a definição das espessuras máximas e mínimas das camadas do pavimento. Os materiais das camadas utilizados, e as respetivas dimensões, estão organizados da seguinte forma:

- AC14 (BB) – 0,04 a 0,06 (m);
- AC20 (MB) – 0,05 a 0,09 (m);
- AC32 (MB) – 0,10 a 0,15 (m).

## 3. Catálogo de dimensionamento de pavimentos no México

### 3.1. Manual e Generalidades

Este capítulo apresenta uma análise detalhada do *Catálogo de Secciones Estructurales de Pavimentos para las Carreteras de la República Mexicana* (SCT, 2012), que serve como guia para o dimensionamento de pavimentos no México. Neste manual, as secções estruturais dos pavimentos foram projetadas utilizando o método da UNAM para pavimentos flexíveis na versão de 1999 e o método AASHTO 1993 para rígidos e semirrígidos (SCT, 2012).

O Método desenvolvido pelo Instituto de Engenharia da UNAM na versão de 1999 (manual 444), incorporou avanços experimentais e teóricos em relação ao método original, publicado em 1974 (manual 325). O método inclui um modelo que calcula as deformações unitárias de fadiga. Além disso, foi introduzido um novo modelo para o dimensionamento de pavimentos de altas especificações, tendo em conta tanto a deformação permanente acumulada quanto a fissuração por fadiga nas camadas betuminosas (Corro et al., 1999).

Os manuais 325 e 444, fornecem a base teórica e experimental para o dimensionamento de pavimentos. Neles está explícito que é possível dimensionar o pavimento tendo em conta o nível de confiança, ou seja, tendo em conta a probabilidade de o pavimento dimensionado durar o tempo de vida útil previsto no respetivo dimensionamento (Corro et al., 1981). Normalmente, um nível de confiança mais alto é aplicado no dimensionamento de uma autoestrada e um nível de confiança mais baixo é aplicado no dimensionamento de estradas com menos tráfego.

Tendo definido o nível de confiança, os manuais 325 e 444 possuem diagramas que auxiliam no dimensionamento da estrutura do pavimento, mais especificamente no cálculo da espessura das camadas, tendo em conta o VRS (valor relativo de suporte crítico esperado em campo) e o tráfego (Corro et al., 1981). VRS é a terminologia mexicana para o reconhecido índice CBR.

Com base nestas diretrizes do método da UNAM, as secções estruturais dos pavimentos flexíveis do Catálogo de Secciones Estructurales de Pavimentos para las Carreteras de la República Mexicana foram projetadas.

Quanto ao método da AASHTO'93, o seu manual de dimensionamento fornece um conjunto de procedimentos que podem ser utilizados para o dimensionamento e reabilitação de pavimentos flexíveis, rígidos, semirrígidos e até pavimentos para estradas de baixo volume de tráfego (superfície não pavimentada). Estes procedimentos incluem a determinação da espessura total da estrutura do pavimento, bem como a espessura de cada componente estrutural individual (AASHTO, 1993).

Para o dimensionamento de pavimentos semirrígidos, o método da AASHTO tem em consideração vários parâmetros, tais como: desempenho do pavimento, tráfego, solo de fundação, materiais de construção, ambiente e clima, drenagem, confiança, custos de ciclo de vida e dimensionamento de bermas. Esta informação pode ser observada na equação 1.

$$\log_{10} W_{18} = Z_R \times S_0 + 9,36 \log_{10}(SN + 1) - 0,2 + \frac{\log_{10} \left[ \frac{\Delta PSI}{4,2-1,5} \right]}{0,4 + \frac{1094}{(SN+1)^{5,19}}} + 2,32 \log_{10} M_R - 8,07 \quad (1)$$

Onde,

- $W_{18}$  é o tráfego, o número de aplicações de carga, em eixos simples equivalentes de 18 kips (8,2 ton);
- $Z_R$  é o valor estatístico representativo do nível de confiança escolhido;
- $S_0$  é o desvio padrão combinado da previsão de tráfego e da previsão de desempenho do pavimento;
- $\Delta PSI$  é o índice de desempenho do pavimento;
- $M_R$  é o módulo de resiliência da fundação, que define a sua capacidade de suporte;
- $SN$  é o número estrutural, representativo da espessura de pavimento requerida.

Para aplicar o método da AASHTO, é necessário primeiramente calcular SN, através da seguinte equação:

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3 \quad (2)$$

Onde,

- $a_i$  é o coeficiente da camada;  $D_i$  é a espessura da camada;  $m_i$  é o coeficiente de drenagem da camada.

Tendo o SN da equação 2 é necessário obter o SN da equação 1, de forma a, em seguida, comparar os dois valores. Para tal, é necessário obter os valores de  $W_{18}$ ,  $Z_R$ ,  $S_0$ ,  $\Delta PSI$ , e  $M_R$ .

O valor de tráfego  $W_{18}$ , é calculado com base no fator de distribuição direcional  $D_D$ , no fator de distribuição de via (para quando existe mais do que uma via por faixa)  $D_L$ , e no número acumulado de eixos-padrão de 18 kips nas duas direções de um determinado troço de estrada durante o período de análise (AASHTO, 1993).

No que toca ao nível de confiança,  $Z_R$ , ele é uma forma de incorporar algum grau de certeza no processo de dimensionamento de maneira a assegurar que as várias alternativas de dimensionamento duram o período de análise.  $Z_R$  está tabelado no manual da AASHTO (AASHTO, 1993).

Relativamente à escolha de um valor para o desvio padrão,  $S_0$ , o manual da AASHTO prevê que, para os casos em que a variação do tráfego futuro projetado é considerada, os valores variam entre 0,40 e 0,50 (AASHTO, 1993).

Quanto ao índice de desempenho,  $\Delta PSI$ , ele varia entre 0 e 5. O  $\Delta PSI$  é obtido através de medidas de irregularidade e patologias numa dada altura durante o tempo de vida do pavimento. Para obter o  $\Delta PSI$ , é

necessário selecionar um valor “Serviceability Index” inicial,  $p_i$ , e um “Serviceability Index” final. Assim,  $\Delta PSI = p_i - p_t$  (AASHTO, 1993).

Por fim, para obter o módulo de resiliência da fundação,  $M_R$ , é necessário saber o valor do CBR, de forma a calcular  $M_R(psi) = 1500 \times CBR$  (AASHTO, 1993).

Com todos estes dados, é possível obter SN através da equação 1. Tendo esse valor de SN, compara-se o mesmo com o SN obtido da equação 2, e, no caso de ser inferior, é necessário aumentar a espessura das camadas dimensionadas ( $D_i$ ).

Tendo em conta todas as informações do método da UNAM e do método da AASHTO, o Catálogo do México é constituído por 3 capítulos relacionados com a sistematização dos dados necessários para o dimensionamento da estrutura de um pavimento: Metodología para el Uso del Catálogo, Secciones de Estructuras de Pavimentos e Rehabilitación de Estructuras de Pavimentos (SCT, 2012). Para além disso, no final do Manual, existe um capítulo “Ejemplo” que resume todo o processo de dimensionamento. É no primeiro capítulo que o projetista verifica os dados necessários para o dimensionamento de pavimentos e percebe como os obtém. Os dados são os seguintes:

- Tráfego;
- Região onde se localiza o pavimento;
- Caracterização dos materiais do pavimento.

Conhecendo os dados anteriores, poderão ser selecionadas, a partir do catálogo, as estruturas do pavimento.

### 3.2. Seleção das secções estruturais do pavimento

#### 3.2.1. Tráfego

Para determinar o tráfego, o Catálogo Mexicano adota o conceito de eixos simples equivalentes ( $\Sigma EE$ ), onde um eixo simples é formado por quatro pneus com uma pressão de contacto de 5,8 kg/cm<sup>2</sup>. Para calcular a  $\Sigma EE$ , utiliza-se o tráfego diário médio anual (TDPA), obtido por meio de contagens de tráfego ou estimativas para estradas novas. Este valor é ajustado considerando a taxa de crescimento do tráfego, que, no México, varia entre 1% a 5% ao ano (SCT, 2012). A equação utilizada para calcular o tráfego projetado (TD) é a seguinte:

$$TD = TDPA_{actual} \times CT = TDPA_{actual} \times 365 \left[ \frac{(1+TC)^n - 1}{TC} \right] \quad (3)$$

Onde,

- TC é a taxa de crescimento, em decimais;
- n é o número de anos de serviço;
- TDPA é o último dado registado do tráfego diário médio anual;
- CT é o coeficiente de acumulação do tráfego.

Tendo o TD, já é possível calcular  $\Sigma EE$ , através da equação:

$$\Sigma EE = (TD) \times (Cd) \times (CD) \times (Ci) \quad (4)$$

Onde,

- $\Sigma EE$  é a soma dos eixos simples equivalentes de 8,2 t, esperados no horizonte de projeto;
- Cd é o coeficiente de dano (em função do tipo de veículo);
- CD é o coeficiente de distribuição por faixa de rodagem (em decimais);
- Ci é o coeficiente de distribuição direcional.

O valor de CD é definido tendo em conta o número de faixas de rodagem em cada sentido e a percentagem de veículos que circulam na respetiva faixa. O  $C_j$  refere-se ao sentido de circulação do tráfego que tem uma maior percentagem de veículos (recomenda-se um valor de 0,5, no entanto ele pode variar entre 0,30 e 0,70) (SCT, 2012).

Tendo calculado  $\Sigma EE$ , significa que o tráfego projetado foi determinado, o que permite classificar a estrada em intervalos de tráfego com base na tabela 1, facilitando a escolha do tipo de pavimento adequado.

### 3.2.2. Condições Climáticas

O México foi dividido em cinco regiões climáticas de acordo com três parâmetros principais: o tipo de terreno, a precipitação pluviométrica e as temperaturas extremas (máxima e mínima) (SCT, 2012). Para determinar a região de um pavimento, é necessário obter a "Classificação Global" ( $C_g$ ), que corresponde à soma dos valores da "Classificação por Influência" ( $C_i$ ). Para obter as  $C_i$ , primeiramente é preciso obter a "Classificação Particular" ( $C_p$ ) de cada um dos parâmetros. A  $C_p$  refere-se às condições climáticas e do terreno da região onde a estrada será construída. É necessário conhecer a temperatura máxima e mínima, a precipitação pluvial máxima e o tipo de terreno (SCT, 2012). Para obter estas informações, utiliza-se o site da *Comisión Nacional del agua* (CNA, 2025).

Tendo o valor de  $C_p$ , a equação usada para calcular a  $C_i$  corresponde à equação 5.

$$C_i = C_p \times F_i \quad (5)$$

Onde,  $F_i$  é o fator de influência, em decimais.

A Classificação Global ( $C_g$ ) é então obtida pela soma dos valores de  $C_i$ , e a estrada é classificada em uma das cinco regiões de acordo com a tabela 2. As regiões variam de R1 (condições mais favoráveis) até R5 (condições mais adversas) (SCT, 2012).

Tabela 2 - Classificação da região em função da classificação global

Classificação Global	Classificação Região
80 a 100	R1
60 a 79,9	R2
40 a 59,9	R3
20 a 39,9	R4
0 a 19,9	R5

### 3.2.3. Seleção da Secção Estrutural

O Catálogo de Dimensionamento de Pavimentos no México, dispõe de duas tabelas com diferentes estruturas de pavimentos: uma tabela para as "Carreteras Normales" e outra para as "Carreteras de Altas Especificaciones". A tabela utilizada neste estudo foi a "Carreteras de Altas Especificaciones", pois o foco foi o dimensionamento de pavimentos de autoestradas. As estruturas estão apresentadas na tabela 3.

Tabela 3 - Estrutura de pavimentos no México

Estrutura Pavimentos Autoestradas				
T1	T2	T3	T4	T5
<p>Diagrama de estrutura de pavimento T1: Camada superior (CA) com espessuras de 15 e 8; Camada intermediária (BH) com espessuras de 25 e 10; Camada inferior (SB) com espessuras de 25 e 25; Camada base (BEC) com espessuras de 5 e 28; Camada de sub-base (SB) com espessuras de 15 e 20.</p>	<p>Diagrama de estrutura de pavimento T2: Camada superior (CA) com espessuras de 16 e 10; Camada intermediária (BH) com espessuras de 25 e 12; Camada inferior (SB) com espessuras de 30 e 25; Camada base (BEC) com espessuras de 10 e 30; Camada de sub-base (SB) com espessuras de 20 e 20.</p>	<p>Diagrama de estrutura de pavimento T3: Camada superior (CA) com espessuras de 18 e 10; Camada intermediária (BH) com espessuras de 25 e 14; Camada inferior (SB) com espessuras de 30 e 20; Camada base (BEC) com espessuras de 10 e 34; Camada de sub-base (SB) com espessuras de 20 e 20.</p>	<p>Diagrama de estrutura de pavimento T4: Camada superior (CA) com espessuras de 20 e 12; Camada intermediária (BH) com espessuras de 30 e 16; Camada inferior (SB) com espessuras de 30 e 20; Camada base (BEC) com espessuras de 10 e 36; Camada de sub-base (SB) com espessuras de 20 e 20.</p>	<p>Diagrama de estrutura de pavimento T5: Camada superior (CA) com espessuras de 23 e 16; Camada intermediária (BH) com espessuras de 30 e 18; Camada inferior (SB) com espessuras de 30 e 25; Camada base (BEC) com espessuras de 10 e 38; Camada de sub-base (SB) com espessuras de 20 e 20.</p>

## 4. Dimensionamento de pavimentos no México pela metodologia da Shell

No capítulo 3 deste artigo, foi possível verificar que no México já vários métodos foram estudados de forma a compreender se os mesmos se adequam às condições mexicanas, nomeadamente o método da AASHTO e da UNAM. No entanto, o mesmo não acontece para a metodologia da Shell.

A metodologia empírico-mecanicista da Shell é assim designada por se utilizarem expressões empíricas para a caracterização mecânica dos materiais e para a definição dos critérios de ruína, e por se considerar o cálculo mecânico do estado de tensão-deformação do pavimento (SHELL, 1978). Neste trabalho, o procedimento

empírico-mecanicista utilizado irá depender de certas condições de dimensionamento, explicadas nas próximas secções do artigo.

Um ponto crítico da verificação estrutural de dimensionamento é a determinação das tensões e extensões nos pontos de interesse da estrutura do pavimento, com o auxílio de um *software* denominado ALIZE™, desenvolvido pelo Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC). O programa informático não irá definir a estrutura do pavimento, mas sim a sua resposta sobre determinadas condições de carregamento.

#### 4.1. Tráfego

A caracterização do tráfego é feita através do número de eixos padrão acumulados ao longo do período de dimensionamento do pavimento. De acordo com SHELL (1978), o eixo padrão a considerar é um eixo simples, tendo em cada extremo duas rodas gémeas, separadas por uma distância “L” de 0,315m. O contacto feito entre a roda e o pavimento origina uma área “A” aproximadamente elíptica, podendo simplificar-se e considerar uma área circular de raio “r”, com 105 mm cada. Considera-se também a pressão “p” igual à pressão de enchimento dos pneus, que neste caso se trata de um valor de 0,6 MPa. Para o trabalho em causa, adotou-se o referido eixo padrão de 80 kN, considerado pelo manual da Shell (SHELL, 1978), representado por dois rodados de duas rodas cada, onde cada uma destas descarrega 20 kN no pavimento. A Figura 1 retrata a sua geometria e a respetiva aplicação da carga no pavimento.



Figura 1 - a) Geometria do eixo padrão; b) Aplicação de carga no pavimento segundo o respetivo eixo padrão.

#### 4.2. Condições Climáticas

Para fins de dimensionamento, a SHELL (1978) desenvolveu um procedimento capaz de relacionar o efeito da ação da temperatura nas misturas betuminosas, através da ponderação das temperaturas médias mensais do ar (MMAT – mean monthly air temperatures). Os valores de MMAT podem ser facilmente obtidos em plataformas meteorológicas. Neste projeto, retiraram-se os valores do *website* Climate Data (Climate data, 2025).

Sendo conhecidos os valores das MMAT de uma determinada região, retira-se o coeficiente de ponderação “w” de cada mês a que corresponde o valor do MMAT, através da equação 6.

$$W = 0,0723 \times e^{0,1296 \times MMAT} \quad (6)$$

Para a Cidade do México, foi obtida uma temperatura equivalente de 18,02 °C.

De seguida, calcula-se a média anual dos fatores de ponderação, ao dividir por 12 o total dos w. A temperatura equivalente obtém-se através da equação 7, equação inversa da equação 6.

$$T_{MMAP} = 7,7068 \times \ln(W_{médio}) + 20,257 \quad (7)$$

No caso das misturas betuminosas, o valor da temperatura média anual ponderada, é obtida utilizando um ábaco da Shell (SHELL, 1978), que fornece o valor da temperatura de serviço de cada camada de misturas betuminosas, em função do TMMAT e da profundidade da camada. Por exemplo, tendo em conta a estrutura do pavimento com BEA da classe de tráfego T1, apresentada na tabela 3, ou seja, uma camada de desgaste de 40 mm, e sendo a TMMAT=18,02°C, é possível concluir que, para uma camada com profundidade média igual a 20 mm, a temperatura de serviço dessa camada (retirada do ábaco da Shell) será 28,2°C.

#### 4.3. Características dos materiais de pavimentação

Na definição das características das misturas betuminosas, há que ter em conta as temperaturas da respetiva região, o tipo de betume que se vai empregar na mistura e o tipo de mistura. Antes de se determinar o módulo

de deformabilidade das misturas betuminosas, é necessário calcular o valor da rigidez do betume, através da equação 8, proposta por Ullidtz e Peattie (Ullidtz et al., 1980).

$$S_b = 1,157 \cdot 10^{-7} \times t_c^{-0,368} \times 2,718^{-IPen} \times (T_{ab,r} - T)^5 \quad (8)$$

Onde,

- $S_b$  é a rigidez do betume (MPa);
- $T_{ab,r} = 98,4 - 26,4 \times \log(\text{pen}_{25r})$ ;
- $T$  é a temperatura de serviço da camada, obtida no cálculo das temperaturas das camadas betuminosas;
- $t_c$  (tempo de carregamento) =  $\frac{1}{v \text{ (km/h)}}$ , (s), sendo  $v$  a velocidade de circulação, cujo valor considerado foi de 60 km/h;
- IPen (índice de penetração do betume em serviço) =  $\frac{20 \times T_{ab,r} + 500 \times \log(\text{pen}_{25r}) - 1955,55}{T_{ab,r} - 50 \times \log(\text{pen}_{25r}) + 120,15}$ 
  - $\text{pen}_{25}$  = penetração do betume a 25°C, (10-1mm);
    - $\text{pen}_{25r} = 0,65 \times \text{pen}_{25}$ , considera-se que o betume sofre um endurecimento de 65% relativamente à penetração original.

Por fim, calcula-se o módulo de deformabilidade da mistura betuminosa, utilizando a equação 9, proposta por SHELL (1978).

$$E_m = 10^{A \text{ ou } B} \quad (9)$$

Para  $S_b$  entre 5 e 1000 MPa tem-se um valor de A igual a:

$$A = \frac{S89 + S68}{2} \times (\log S_b - 8) + \frac{S89 + S68}{2} \times |\log S_b - 8| + Sm108 \quad (10)$$

Para  $S_b$  entre 1000 e 3000 MPa tem-se um valor de B igual a:

$$B = (Sm3109 - Sm108 - S89) \times \frac{\log S_b - 9}{\log 3} + Sm108 + S89 \quad (11)$$

Onde,

$$S89 = 1,12 \times \frac{(Sm3109 - Sm108)}{\log 30}; \quad (12)$$

$$S68 = 0,6 \times \log \left( \frac{1,37 \cdot v_b^2 - 1}{1,33 \cdot v_b - 1} \right); \quad (13)$$

$$Sm3109 = 10,82 - \frac{1,342 \times (100 - v_a)}{v_a + v_b}; \quad (14)$$

$$Sm108 = 8 + 5,68 \cdot 10^{-3} \cdot v_a + 2,35 \cdot 10^{-4} \cdot v_a^2 \quad (15)$$

- $v_a$  é a percentagem volumétrica de agregado;
- $v_b$  é a percentagem volumétrica de betume;
- $E_m$  é o módulo de deformabilidade das misturas betuminosas (Pa).

Para efeitos do dimensionamento apresentado no presente trabalho, utilizaram-se as seguintes propriedades volumétricas nas misturas betuminosas,  $v_a$ ,  $v_b$  e  $v_v$ .

- Misturas betuminosas do tipo AC14 – 84%, 12% e 4%;
- Misturas betuminosas do tipo AC20 – 84%, 10% e 6%;
- Misturas betuminosas do tipo AC32 – 84%, 9% e 7%.

O betume utilizado como referência neste trabalho foi um betume mais duro, ou seja, um betume que quando submetido ao ensaio de penetração resulta uma penetração 35/50.

Para calcular o módulo de deformabilidade das camadas granulares utilizou-se a equação 16, proposta por Claessen et al. (1977).

$$E_g = k \times E_f \quad (16)$$

Onde,

- $k = 0,2 \times h_g^{0,45}$ , k entre 1,5 e 4,  $h_g$  é a espessura da camada granular (mm);
- $E_f$  é o módulo de deformabilidade da camada inferior. Caso se trate da fundação, no México, é adotado o valor 120MPa.

De acordo com o Manual Francês Conception et Dimensionnement des Structures de Chaussée (METT, 1994), o módulo de deformabilidade das camadas granulares máximo a adotar é de 360 MPa, informação que foi tida em consideração no dimensionamento do pavimento pelo método da Shell.

Realizando os cálculos anteriormente mencionados, é possível obter os módulos de deformabilidade de cada camada da respetiva estrutura do pavimento, apresentados na tabela 4.

Tabela 4 - Estrutura de pavimentos no México

		T1	T2	T3	T4	T5
Módulos deformabilidade (betume 35/50)	BH (MPa)	3600	3600	3600	3600	4700
		4200	4400	4500	4500	4600
		360	360	360	360	360
		280	310	310	310	310
	BEA (MPa)	3600	3600	3600	3600	3600
		3700	4100	4100	4200	4200
		4500	4700	4600	4800	4800
		280	280	260	260	280
	BEC (MPa)	3600	3600	3600	2500	3600
		15000	3900	3900	2600	3900
		220	15000	15000	15000	15000
			260	260	260	260

Legenda

camada betuminosa
camada granular
camada estabilizada com cimento

#### 4.4. Critérios de ruína

Os dois principais critérios de ruína considerados na metodologia da Shell são os critérios de fadiga e os de deformação permanente. O primeiro pode ser aplicado para camadas constituídas por misturas betuminosas, determinando a extensão horizontal de tração na base das camadas, e para camadas de materiais estabilizados com ligantes hidráulicos, como é o caso da camada estabilizada com cimento (BEC), determinando a tensão horizontal de tração na base da camada. Com o critério de deformação permanente, pretende-se determinar a extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação.

As equações 17 e 18 correspondem ao cálculo da extensão de tração na base das camadas betuminosas ( $\epsilon_t$ ) e a extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação ( $\epsilon_v$ ).

$$\epsilon_t = (0,856 \times V_b + 1,08) E_m^{-0,36} \times N_{80}^{-0,2} \quad (17)$$

Onde,

- $N_{80}$  é o valor de eixos padrão de 80kN;
- $E_m$  é o módulo de deformabilidade da mistura betuminosa (Pa).

$$\epsilon_v = 0,018 \times N_{80}^{-0,20} \quad (18)$$

Para determinar o valor da tensão horizontal de tração na base da camada em materiais tratados com ligantes hidráulicos, utiliza-se a equação 19, de acordo com (INIR, 2012).

$$\sigma_t = (1 - 0,08 \log N_{80}) \times R_t \quad (19)$$

Onde  $R_t$  é a resistência à tração por flexão dos materiais tratados com ligantes hidráulicos.

Após determinadas as extensões e tensões, através do *software* de cálculo ALIZE™, é possível determinar o número de eixos padrão admissíveis, com o auxílio das expressões anteriores. Por fim, com o número de eixos padrão atuantes (de projeto) e admissíveis, determina-se o dano ( $D_{total}$ ) para o respetivo tempo de vida da estrutura, através da equação 20, baseada na Lei de Miner (Miner, 1945).

$$D_{total} = \frac{N_{projeto}}{N_{admissivel}} \quad (20)$$

Onde,

- $N_{projeto}$  é o número de passagens de projeto, definido na caracterização do tráfego;
- $N_{admissivel}$  é o número de passagens admissíveis, calculado através dos critérios de dimensionamento anteriormente referidos.

## 5. Análise dos resultados obtidos

Na figura 2 estão apresentados os resultados obtidos no dimensionamento de pavimentos pelo método da Shell, bem como os valores a considerar tendo em conta o Manual de Dimensionamento de Pavimentos no México.

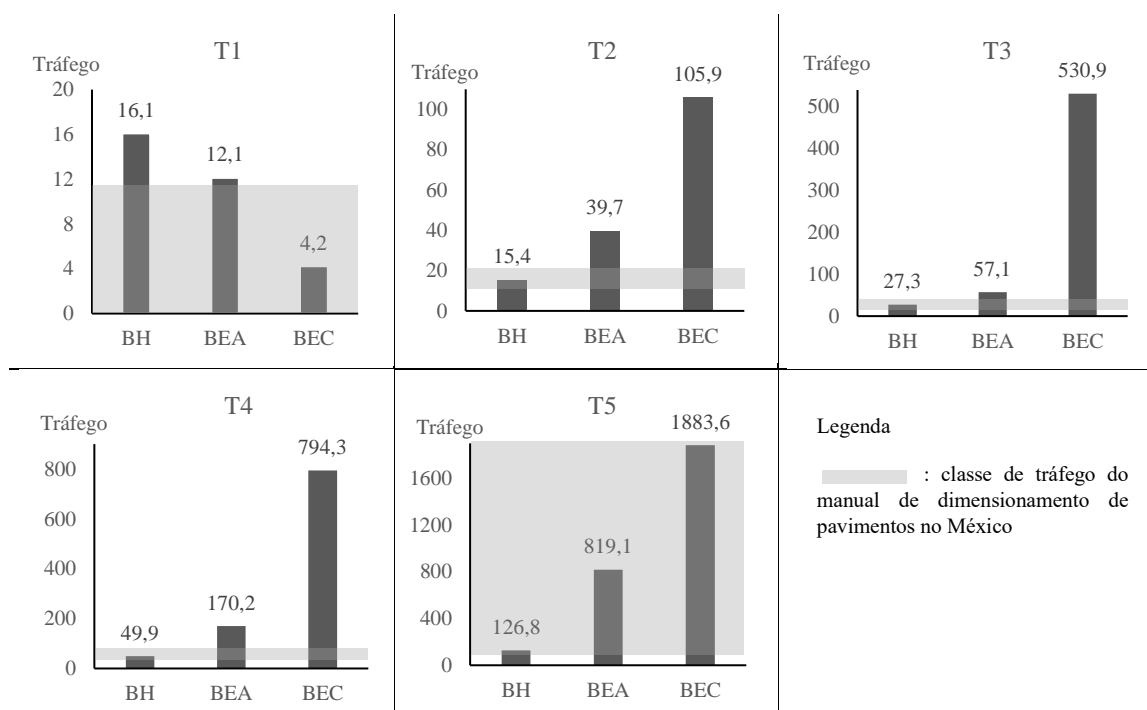


Figura 2 - Resultados dimensionamento de pavimentos na Cidade do México pelo Método da Shell

Para a classe de tráfego T1, o tráfego obtido deveria ser menor ou igual a 10 000 000. No caso da classe de tráfego T2, T3, T4 e T5, o intervalo deveria estar entre 10 000 000 e 20 000 000, 20 000 000 e 40 000 000, 40 000 000 e 80 000 000, e ser maior do que 80 000 000, respetivamente. Fazendo a análise dos resultados, verifica-se que os valores obtidos na avaliação estrutural dos pavimentos pela metodologia da Shell, na sua maioria, não chegaram a conclusões idênticas ou próximas à do Catálogo de dimensionamento do México, uma vez que em cada classe de tráfego, apenas um tipo de estrutura de pavimento, se enquadra nas classes de tráfego do Catálogo. Para a classe T1, o pavimento com uma base estabilizada com cimento é o único que se enquadra no respetivo intervalo de tráfego. No caso das classes T2, T3 e T4, é o pavimento com BH. Por fim, na classe T5 todos os pavimentos cumprem com a classe de tráfego.

Realça-se o facto de todos os resultados que não se enquadram nos intervalos previstos no Catálogo Mexicano, serem superiores aos valores indicados.

## 6. Conclusões

De acordo com os resultados obtidos ao longo deste estudo foi possível tirar as seguintes conclusões:

1. Existe uma diferença relevante entre os valores apresentados no Catálogo local do México e os resultados obtidos através do dimensionamento de pavimentos pela metodologia da Shell. No geral, os valores obtidos pelo método da Shell foram superiores aos valores do Manual. Demonstra-se assim que o catálogo é um instrumento de dimensionamento mais conservador que a metodologia empírico-mecanicista;
2. A grande diferença observada entre as capacidades de carga obtidas pelo método da Shell e os intervalos de tráfego do manual mexicano pode ser explicada pelo nível de confiança adotado no Catálogo Mexicano (95% para autoestradas). De acordo com Afonso et al. (2019), um nível de confiança de 90% no método da AASHTO permite obter resultados mais próximos aos obtidos pelo método da Shell;

Em virtude dos pontos 1 e 2, é possível concluir que o Catálogo de Secciones Estructurales de Pavimentos para las Carreteras de la República Mexicana está sobredimensionado em relação à metodologia empírico-mecanicista da Shell com os parâmetros definidos. Os critérios de dimensionamento adotados são mais conservadores, resultando em estruturas de pavimentos maiores do que aquelas que seriam realmente necessárias para suportar as condições de tráfego exigidas. Na prática, seria possível dimensionar pavimentos com espessuras menores que atendessem adequadamente às exigências de desempenho. Embora a abordagem do manual possa ser interpretada como uma forma de priorizar a segurança e a durabilidade do pavimento, ela resulta em estruturas que implicam custos e recursos superiores aos necessários, sendo possível alcançar o mesmo nível de desempenho com menores investimentos. De uma forma geral, conclui-se que a metodologia da Shell poderia ser aplicada no dimensionamento de pavimentos no México, levando a estruturas de pavimentos mais econômicas e com um desempenho semelhante ao atual. No entanto, verifica-se que os catálogos, embora mais conservativos, são igualmente uma boa ferramenta de dimensionamento, que priorizam a segurança e durabilidade dos pavimentos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO. (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*.
- Afonso, J., & Cardoso, S. (2019). *Avaliação da capacidade de carga de pavimentos rodoviários em Portugal pela Metodologia Empírico-Mecanicista Shell e sua Comparação com a metodologia AASHTO '93*.
- Claessen, A. I. M., Edwards, J. E., Summer, P., & Hughes, P. (1977). *Asphalt pavement design. The Shell method, Fourth International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements*.
- Climate data. (2025). *Clima México*. <https://pt.climate-data.org/america-do-norte/estados-unidos-da-america/missouri/mexico-16890/>
- CNA. (2025). *Servicio Meteorológico Nacional*. [www.smn.cna.gob.mx](http://www.smn.cna.gob.mx)
- Corro, Santiago, Guillermo Prado, & A. Rangel. (1999). *Diseño estructural de pavimentos asfálticos, incluyendo carreteras de altas especificaciones, Series del Instituto de Ingeniería, UNAM*.
- Corro, Santiago, & Roberto Magallanes. (1981). *Instructivo para diseño estructural de pavimentos flexibles para carreteras, Series del Instituto de Ingeniería*.
- EP. (2009). *Caderno de Encargos Tipo Obra: 16.03 – Pavimentação – Dicionário de rubricas e critérios de medição*.
- INIR. (2012). *Diretiva para a conceção de pavimentos – Critérios de Dimensionamento*, Instituto de Infraestruturas Rodoviárias, Infraestruturas de Portugal.
- Miner, M. A. (1945). *Cumulative damage in Fatigue*.
- Ministère de l'Équipement des Transports et du Tourisme. (1994). *Conception et dimensionnement des structures de chaussée*.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes & Dirección General de Servicios Técnicos (2012). *Catálogo de secciones estructurales de pavimentos para la República Mexicana*.
- SHELL. (1978). *Shell Pavement Design Manual*, Shell International Petroleum Company.
- Ullidtz, Per, Pettie, & Kenneth R. (1980). *Pavement analysis by programmable calculators*. Transportation Engineering Journal of ASCE.