

CONSIDERAÇÕES SOBRE A DETERMINAÇÃO DO FATOR DE VEÍCULO NO CÁLCULO DO NÚMERO N

Jorge Barbosa Soares⁽¹⁾

Laura Maria Goretti da Motta⁽²⁾

⁽¹⁾ Universidade Federal do Ceará – PETRAN/UFC

⁽²⁾ Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ

RESUMO

São discutidos aspectos importantes sobre a determinação do Fator de Veículo, parâmetro base no cálculo do número N. Apresentam-se inconsistências comuns na determinação deste fator a partir de erros no cálculo do Fator de Eixo, incorridos por falta de uma maior clareza nas recomendações do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). Isto tem levado, em algumas ocasiões, a determinação de valores diferentes de N, mesmo partindo-se dos mesmos dados de contagem de tráfego. Um estudo de caso é apresentado para facilitar a discussão. Embora seja um assunto já bastante debatido pela comunidade de pavimentação, acredita-se que o trabalho é uma contribuição relevante no que diz respeito ao esclarecimento de parâmetros importantes para o dimensionamento e gerenciamento de pavimentos, esperando contribuir para tornar clara a metodologia de cálculo dos fatores discutidos.

ABSTRACT

This paper presents important aspects related to the determination of the Vehicle Factor, a basic parameter in the calculation of the Total Equivalent Operations. Common inconsistencies in the determination of this factor, result of the incorrect calculation of the Axle Factor due to ambiguity in the recommendations, are discussed. This has led to different values of the Total Equivalent Operations even when considering the same traffic data. A case study is presented to facilitate the discussion. Even though the subject has been extensively discussed in the pavement community, the study represents a relevant contribution in the sense that it clarifies the calculation of important parameters used in pavement design and management. It is expected that the study will lead to a more clear methodology for the calculation of the discussed factors.

1. INTRODUÇÃO

Os diversos métodos de dimensionamento de pavimentos utilizam algum parâmetro relativo ao tráfego. No caso de pavimentos rodoviários, o mais comumente usado é o chamado número N, definido como o número de repetições do eixo padrão de roda dupla de 8,2 tf. A base do cálculo deste parâmetro é o Volume Médio Diário anual de veículos (comerciais ou total) (VMDa) e o Fator de Veículo (FV) da respectiva frota. Este último, por sua vez, pode ser determinado a partir de dois parâmetros: Fator de Eixo (FE) e Fator de Carga (FC).

Apesar de largamente utilizados pela comunidade técnica e científica de pavimentação, os parâmetros mencionados são revistos neste artigo, com o objetivo de tornar mais clara a determinação dos mesmos. A falta de clareza nas recomendações do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER, 1996) e na literatura nacional em geral (Souza, 1966; Senço, 1997; DNER, 1998) têm levado, em algumas ocasiões comprovadas pelos autores, a uma determinação incorreta do número N. A motivação da discussão apresentada neste artigo foi o estudo de Pesagem de Veículos de Carga realizado recentemente para o Estado do Ceará no qual foram levantadas várias questões relativas a tradução dos dados de tráfego, incluindo a incorporação de dados de pesagem (ASTEF, 2001 e Soares et al., 2001).

Embora haja uma tendência internacional de reformulação na utilização do parâmetro de tráfego no dimensionamento de pavimentos, conforme discussões preliminares do Manual de Projetos

AASHTO 2002 (Hallin, 2000), o número N ainda é um parâmetro de cálculo fundamental no Setor de Transportes no Brasil, tanto pela sua utilização direta no dimensionamento de pavimentos, como por seu uso na gerência de pavimentos e na classificação das vias.

O principal aspecto levantado neste trabalho, residindo aí a sua contribuição em um tópico aparentemente já tão dissecado, diz respeito aos modos de obtenção do FE e do FV preconizados pelo DNER, e, por conseguinte, utilizados em diversos órgãos rodoviários estaduais. Estes fatores também são freqüentemente usados na comunidade científica, uma vez que os parâmetros de tráfego de campo servem para a calibração de modelos de fadiga desenvolvidos em laboratório.

Discute-se a metodologia de cálculo dos fatores FE e FV, destacando-se um erro comum na obtenção dos mesmos, fruto da falta de clareza das recomendações hoje estabelecidas. De acordo com a experiência dos autores, tal falta de clareza tem levado consultoras e órgãos rodoviários a realizarem os cálculos de FE, e, por conseguinte de FV, de maneiras distintas, levando a resultados diferentes do número N, partindo-se dos mesmos dados de contagem de tráfego.

Vale observar ainda que o trabalho não se propõe a discutir os Fatores de Equivalência de Carga (FEC) que levam aos Fatores de Carga (FC). Em outras palavras, não se entra no mérito de qual FEC é mais apropriado, uma vez que o valor deste parâmetro está relacionado ao critério pré-estabelecido para comparação do efeito de diferentes configurações e pesos de eixos de veículos, como por exemplo, deflexão (Foster e Ahlvin, 1958) ou tensão vertical no topo do subleito (Boyd e Foster, 1950; Turnbull et al., 1962); deformação ou tensão de tração na fibra inferior do revestimento (Deacon, 1969; Pereira, 1992; Fernandes Jr., 1994); PSI (AASHTO, 1993), etc.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O tráfego é o principal carregamento a ser considerado em todo método de dimensionamento, seja empírico ou mecanístico, seja de pavimentos de concreto-cimento ou pavimentos asfálticos. Em qualquer caso há a necessidade de se modelar o tráfego real ao longo da vida útil do pavimento, visto que este carregamento real é bastante complexo: cargas aleatórias, várias configurações de eixo e de rodas, velocidades variáveis, posição de solicitação variável, etc.

Nos métodos de dimensionamento empíricos, soluções utilizadas para expressar o tráfego são:

- Dividir o tráfego em duas classes: leve e pesado, não se explicitando claramente o que representa cada carga, como, por exemplo, no método original do CBR de Porter da década de 30 – curvas A e B de dimensionamento originais de Porter;
- Usar a carga máxima de cada categoria de veículo para calcular as espessuras das camadas do pavimento como no método do DNER de 1961 (Souza, 1961) e o método da para pavimentos de concreto-cimento (ABCP, 1998); também usado em aeroportos;
- Transformar o espectro total de cargas em um número que expressa um tráfego imaginário que representa o mesmo efeito destrutivo do tráfego real, como nos métodos da AASHTO (1993) e do DNER (Souza, 1966; DNER, 1996) – número N.

Nos métodos de dimensionamento mecanísticos também pode ser usada a transformação do tráfego real em número N (Motta, 1991), ou se trabalhar com cada grupo de eixos separados, calculando o efeito de cada um sobre a estrutura, tal como nos métodos LED (Layered Elastic

Design) para aeroportos (FAA, 1995) e PCA para pavimentos de concreto-cimento (PCA, 1966 e 1984 apud DNER, 1989). A dificuldade em se fazer isto para pavimentos asfálticos rodoviários está no fato de não haver para misturas asfálticas uma relação aceita de limite de fadiga como a existente para pavimentos de concreto-cimento, ou seja, uma certa relação de σ_t/σ_R (tensão de tração solicitante /resistência a tração), com número de operações admissíveis ilimitado.

O método de dimensionamento de pavimentos flexíveis oficializado desde 1966 pelo DNER (Souza, 1966) é uma variante do método do Corpo de Engenheiros dos Estados Unidos - USACE (Turnbull et al., 1962). Em ambos os casos, o projeto do pavimento é sensível ao parâmetro relativo à ação do tráfego, que é por sua vez função dos FEC_j usados para converter os números de solicitações das diversas cargas de eixo em números equivalentes de solicitações do eixo padrão de 8,2 tf. Este artigo trata fundamentalmente do parâmetro de tráfego do método do DNER, o número N, discutindo as variáveis envolvidas na determinação deste parâmetro.

2.1 Fator de Equivalência de Carga

No presente artigo, os autores consideram os FEC_j tradicionais e não aprofundam discussões sobre o uso de outros FEC_j , como os mecanísticos apontados por exemplo por Pereira (1992). Fernandes Jr. (1994) faz considerações pertinentes sobre o efeito do tráfego no desempenho dos pavimentos e também trata de fatores mecanísticos desenvolvidos a partir de uma análise paramétrica feita com oito estruturas típicas de pavimentos, utilizando os programas ELSYM5 e ILLIPAVE, o que permite considerar o efeito nos FEC_j de diferentes variáveis.

No Brasil, dois grupos de FEC_j são utilizados tradicionalmente para calcular o N:

1. Os fatores que compõem o método de dimensionamento de pavimentos novos do DNER (Souza, 1966; DNER, 1996), que tem origem no trabalho de Turnbull et al. (1962), somente para eixo simples e duplo. São os chamados fatores do USACE. Estes fatores transformam o efeito de cada carga para o efeito de um eixo simples de roda dupla, tendo como referência o afundamento plástico no subleito, considerado a 70 cm de profundidade (Pereira, 1985), e tendo como limite o padrão de 1 polegada de afundamento. Na década de 70 surgiram os eixos triplos, e Souza (1981) propôs um FEC para este tipo de eixo, com base em fatores arbitrários não expressos pelo autor, mas tendo por base aparentemente um fator de redução de 0,85 por acoplagem de eixo. Tal hipótese foi usada à época na proposição dos pesos máximos por eixo da seguinte forma:
 - o Eixo simples: 10 tf
 - o Eixo duplo: $(10 \text{ tf} \times 2) \times 0,85 = 17 \text{ tf}$
 - o Eixo triplo: $(10 \text{ tf} \times 3) \times 0,85 = 25,5 \text{ tf}$

A variação do FEC com o peso por eixo simples, duplo ou triplo (P_s , P_d , P_t), é dada em forma gráfica em Souza (1966, 1981) ou tabela (eixo triplo) e mais recentemente em forma de equações, indicadas na Tabela 1 deste trabalho (DNER, 1998).

2. Os fatores que compõem o método de projeto do DNER PRO 159/85, que às vezes são ditos da AASHTO, com expressões que têm origens distintas (Queiróz, 1981, 1982):
 - o $FEC_{\text{Eixo simples roda simples}} = (P_{ss}/7,77)^{4,32}$ (GEIPOT, 1977)
 - o $FEC_{\text{Eixo simples roda dupla}} = (P_s/8,17)^{4,32}$ (AASHTO, 1972)

- $FEC_{\text{Eixo duplo roda dupla}} = (Pd/15,08)^{4,14}$ (AASHTO, 1972)
- $FEC_{\text{Eixo triplo}} = (Pt/22,95)^{4,22}$ (Treybig e Von Quintus, 1976)

Tabela 1: Fatores de equivalência de carga – USACE (DNER, 1998)

Tipo de Eixo	Faixas de Cargas (tf)	Equações (P em tf)
Dianteiro simples e traseiro simples	0 – 8	$FEC = 2,0782 \times 10^{-4} \times P^{4,0175}$
	≥ 8	$FEC = 1,8320 \times 10^{-6} \times P^{6,2542}$
Tandem duplo	0 – 11	$FEC = 1,5920 \times 10^{-4} \times P^{3,4720}$
	≥ 11	$FEC = 1,5280 \times 10^{-6} \times P^{5,4840}$
Tandem triplo	0 – 18	$FEC = 8,0359 \times 10^{-5} \times P^{3,3549}$
	≥ 18	$FEC = 1,3229 \times 10^{-7} \times P^{5,5789}$

P = peso bruto total sobre o eixo

Destaca-se mais uma vez que o objetivo deste artigo não é discutir os FEC_j mais adequados, e sim, tentar esclarecer a metodologia recomendada pelo DNER para o cálculo do FV a partir de FEC_j previamente escolhidos. Na presente discussão os FEC_j apresentados na Tabela 1 são usados, porém a análise é válida para quaisquer FEC_j , inclusive mecânicos.

2.2 Fator de Carga

O Fator de Carga (FC) é definido pelo DNER (1996) como “um número que, multiplicado pelo número de eixos que operam, dá o número de eixos equivalentes ao eixo padrão”. O termo "eixos" em o "... número de eixos que operam ..." se refere aos "conjuntos de eixo" (simples, duplo ou triplo) e não a cada "eixo individual". Esta terminologia é usada deste ponto em diante neste artigo e é importante que a distinção entre "eixos individuais" e "conjuntos de eixo" fique clara na discussão dos fatores discutidos. Por exemplo, um conjunto de eixo triplo, ou um tandem triplo como é chamado, é composto por três eixos individuais que trabalham acoplados, assim como um tandem duplo é composto por dois eixos individuais acoplados.

Note que enquanto FEC trata da correspondência entre um único conjunto de eixo (simples, duplo ou triplo) e o eixo padrão simples de roda dupla, FC é relativo a todos os conjuntos de eixo que operam na via. Portanto, FC é um FEC ponderado pelos diversos conjuntos de eixo da frota de veículos. Para a determinação do FC, o DNER recomenda o uso da Tabela 2 a partir dos FEC_j e dos respectivos percentuais relativos (P_j) a cada conjunto de eixo.

Tabela 2: Cálculo do Fator de Carga (Souza, 1981; DNER, 1996)

Eixos Simples (tf)	Frequência na amostra	Porcentagem (P_j)	FEC_j^*	Equivalência de Operações ($P_j \times FEC_j$)
t_1	n_1	P_{j1}	FEC_1	$P_{j1} \times FEC_1$
t_2	n_2	P_{j2}	FEC_2	$P_{j2} \times FEC_2$
...
Eixos Tandem(tf)				
t'_1	n'_1	P'_{j1}	FEC'_1	$P'_{j1} \times FEC'_1$
t'_2	n'_2	P'_{j2}	FEC'_2	$P'_{j2} \times FEC'_2$
...
		100		FC

* FEC_j obtido a partir das expressões na Tabela 1

O DNER (1996, 1998) apresenta ainda a seguinte expressão para a determinação do FC:

$$FC = \frac{\sum (P_j \times FEC_j)}{100}$$

em que: $P_j \times FEC_j$ = equivalência de operações relativa a cada eixo específico

2.3 Fator de Eixo

O Fator de Eixo (FE) é definido pelo DNER (1996) como o “número que, multiplicado pelo número de veículos dá o número de eixos correspondentes”. Note que este conceito, assim como o do FC, é relativo a todos os eixos que operam na via, portanto um conceito associado à frota, e não a cada categoria de veículo. Este fator é dado por: $FE = n/V_t$, em que: n = número total de eixos da frota; V_t = volume total do tráfego na amostragem.

Chama-se atenção para o fato de não ficar claro nas recomendações do DNER se o termo "eixos" na definição de FE, e conseqüentemente na variável "n" acima, refere-se a "conjuntos de eixo" (simples, duplo ou triplo) ou a "eixos individuais". Trata-se de uma diferença sutil com grande repercussão no cálculo do FV e, por conseguinte, do número N, conforme é mostrado adiante. No cálculo de FE, o conceito de “conjuntos de eixo” deve ser usado de modo que esse parâmetro seja compatível com a definição do FC. Estes fatores são multiplicados um pelo outro numa das formas de determinação do FV e, portanto, devem ser calculados a partir da mesma base conceitual. Porém, a experiência dos autores indica que a dúvida é recorrente no meio técnico.

A falta de clareza na distinção entre "eixos individuais" e "conjuntos de eixo" repete-se em uma outra forma também usada para a determinação de FE (Souza, 1966; Senço, 1997):

$$FE = (p_2/100) \times 2 + (p_3/100) \times 3 + \dots + (p_n/100) \times n$$

em que: p_2 = porcentagem de veículos de 2 eixos; p_3 = porcentagem de veículos de 3 eixos; p_n = porcentagem de veículos de n eixos. Estas porcentagens estão associadas a "eixos individuais" ou a "conjuntos de eixo"? Por exemplo, para o semi-reboque 2S3 durante o cálculo de FE, assume-se na expressão acima este veículo com 5 "eixos individuais" ou com 3 "conjuntos de eixo" (1 eixo simples de roda simples dianteiro, 1 eixo simples de roda dupla, e 1 eixo triplo)?

No primeiro exemplo de tráfego apresentado em Souza (1966), um marco na literatura de pavimentação no país, considera-se 90% de veículos com 2 eixos e 10% de veículos com 3 eixos. FE é calculado como $(0,9 \times 2) + (0,1 \times 3) = 2,1$. O significado do termo "eixos" não é claro na referência, e isto talvez explique dúvidas ainda hoje existentes.

A diferença no valor de FE, quando se consideram "eixos" ou "conjuntos de eixo", é tanto maior quanto maior for o número de conjuntos de eixo com eixos duplos e principalmente triplos. Uma análise de sensibilidade do FE à composição da frota com base nas duas hipóteses mencionadas é ilustrada na Tabela 3. Além dos valores de FE, apresenta-se o incremento (delta, em porcentagem) neste fator quando se adota a hipótese de “eixos individuais”. Foram consideradas situações teóricas de apenas uma categoria de veículo, bem como diferentes composições de categorias. FE independe do valor absoluto do VMDa. São muitas as possibilidades, pois se poderia exemplificar com várias ponderações a quantidade de veículos em cada categoria. Tal exercício pode ser feito facilmente, inclusive incluindo outras categorias de veículos.

Tabela 3: Análise de sensibilidade de FE

Categoria	(i)	(ii)	(iii)	(iv)	(v)	(vi)	(vii)	(viii)	(ix)	(x)
Caminhão médio (2C)	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0
Caminhão pesado (3C)	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0
Semi-reboque (2S2)	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1
Semi-reboque (2S3)	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1
Semi-reboque (3S3)	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1
FE (eixos individuais)	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	2,5	3,0	3,5	4,0	5,0
FE (conjuntos de eixo)	2,0	2,0	3,0	3,0	3,0	2,0	2,3	2,5	2,6	3,0
Delta (%)	0,0	50,0	33,3	66,7	100,0	25,0	28,6	40,0	53,9	66,7

A hipótese dos “eixos individuais” obviamente sempre leva a valores superiores de FE, exceto quando a frota é composta apenas de veículos 2C, situação na qual ambas as hipóteses levam ao mesmo fator. O caso extremo de diferença ocorre quando se têm apenas veículos 3S3.

Neste momento é importante observar que no trabalho de Turnbull et al. (1962), que deu origem ao método de dimensionamento de pavimentos flexíveis no Brasil (Souza, 1966), não é definido especificamente um FC ou um FE. Turnbull et al. calculam um parâmetro denominado Total de Equivalência de Operações dado pelo somatório de $O_j \times FEC_j$ indicado na última coluna da Tabela 4, onde O_j é o número de operações de cada conjunto de eixo, separados por tipo e peso. O Total de Equivalência de Operações é igual ao que no Brasil está definido como $FE \times FC \times VMDa$, desde que FE seja calculado com base no "conjunto de eixos" de acordo com a discussão anterior. Portanto, FE deve ser determinado considerando-se o "conjunto de eixos" e não "eixos individuais". Tal assertiva não é colocada de forma explícita na literatura nacional levando a cálculos inconsistentes do FV, conforme ilustrado na seção seguinte.

Tabela 4: Cálculo do Total de Equivalência de Operações (Turnbull et al., 1962)

Eixos Simples (tf)	FEC _j *	Operações por dia	Equivalência de Operações ($O_j \times FEC_j$)
t ₁	FEC ₁	O ₁	O ₁ × FEC ₁
t ₂	FEC ₂	O ₂	O ₂ × FEC ₂
...	...		
Eixos Tandem (tf)			
t' ₁	FEC' ₁	O' ₁	O' ₁ × FEC' ₁
t' ₂	FEC' ₂	O' ₂	O' ₂ × FEC' ₂
...
Total de Equivalência de Operações			$\Sigma (O_j \times FEC_j)$

* Chamado Fator de Equivalência de Operações no trabalho original

2.4 Fator de Veículo

O Fator de Veículo (FV) é definido como “um número que multiplicado pelo número de veículos que operam, dá, diretamente, o número de eixos equivalentes ao eixo padrão” (DNER, 1996). De acordo com o DNER, este fator pode ser calculado de duas maneiras:

a) $FV = FE \times FC$

b) $FV = \frac{\sum(P_i \times FV_i)}{100}$, sendo FV_i = fator de veículo individual para as diferentes categorias de veículos (automóveis, ônibus, caminhões leves, caminhões médios, caminhões pesados, reboques e semi-reboques). Os FV_i para automóveis e caminhões leves são considerados desprezíveis.

Estes métodos de determinação de FV são iguais desde que FE seja calculado com base nos "conjuntos de eixo". Conforme já mencionado, é comum no meio técnico o uso do conceito de "eixos individuais" para cálculo de FE. Neste último caso as duas expressões de FV acima levam a valores diferentes, com conseqüente impacto no cálculo do número N.

O FV determinado pela expressão (a) é associado a dois parâmetros, FC e FE, que são determinados sem se considerar a categoria dos veículos, portanto conceitos da frota. Na expressão (b) introduz-se a variável "categoria de veículo". O FV_i relativo a cada categoria é obtido somando-se os FEC_i de cada conjunto de eixo desta categoria. No trabalho original de Turnbull et al. (1962), não há o conceito de FV, FC ou FE, e sim de Total de Equivalência de Operações, que por sua vez é um parâmetro relativo a frota e não a cada categoria de veículo. No Brasil, o FV foi originalmente definido como um parâmetro relativo a frota por Souza (1966).

A introdução do conceito de FV_i para cada categoria de veículo foi feita por Queiróz (1982) no meio técnico brasileiro, e certamente estava ligado ao fato da pesquisa ICR da qual o citado autor participava, estar introduzindo no Brasil os fatores de equivalência de operação ligados à AASHTO, que trabalha com esta forma de apresentação. Nesta pesquisa foram definidas 13 classes de veículos, sendo a classe 1 referente a automóveis, a classe 2 referente a ônibus e a classe 13 a reboques, como exemplos. Apresentava Queiróz um estudo de caso em que, para uma certa distribuição de veículos comerciais de uma frota, e uma certa proporção de pesos por veículos, $FV = 0,441$ para a frota sem nenhuma sobrecarga (sem excesso de carga em todos os veículos ou eixos) e $FV = 4,63$ para a condição de 27% da frota com um certo excesso de carga por eixo, em determinadas classes. Portanto, utilizar estes valores implica em admitir os FEC do modo (b) acima exposto e a composição de carga igual à usada neste caso.

Seguindo esta linha de formulação do FV por categoria, trabalhos de pesagem realizados por equipes de Pernambuco foram apresentados em duas reuniões da ABPv e tem sido usados freqüentemente por consultores e projetistas de todo o Nordeste desde então: Sales et al. (1987) e Menezes et al. (1988). Estes artigos apresentam fatores de veículos para classes de ônibus, caminhões médios, caminhões pesados e reboques e semi-reboques (juntos), para os FEC do USACE (Souza,1981) e da AASHTO, depois PRO159/84 (Queiróz, 1982). Para as estradas do Nordeste onde estas pesagens foram feitas por amostragem, várias foram as condições de distribuição de frotas encontradas e de percentuais de excesso por eixo ou por categoria de veículos. Por exemplo, numa certa pesagem, entre os ônibus foi encontrado 4,3% de eixos com excesso, 20,8% entre os caminhões médios, 16,3% entre os caminhões pesados e 49,1% entre os reboques. No entanto, não foi detalhado quanto de excesso em cada caso, mas estes valores estão

certamente embutidos nos FV calculados por categoria (Menezes et al., 1988). Em Sales et al. (1987) comenta-se que as diferenças entre FV sem sobrecarga e com sobrecarga variaram entre 19,5% a 488,7% conforme a região considerada. O uso destes valores ainda hoje em projetos atuais deve ser feito com bastante cuidado e consciência pelos projetistas. Os hábitos de carga e os veículos vêm mudando muito nos últimos tempos (Albano, 1998). Soares et al. (2001) em recente pesagem no estado do Ceará relatam terem encontrado nas rodovias estaduais investigadas, 17,3% de veículos com excesso de aproximadamente 7,8% em relação ao peso legal.

2.5 Número N

O número N é definido pelo DNER (1996) como “o número equivalente de operações do eixo simples padrão durante o período de projeto” e é dado por: $N = V_t \times FV$, em que, V_t = volume total de tráfego durante o período de análise. Este parâmetro é igual ao Total de Equivalência de Operações de Turnbull et al. (1962). Admitindo-se uma taxa t de crescimento anual em progressão geométrica e V_1 como sendo o volume médio diário de tráfego num sentido no ano de início:

$$V_t = 365 \times V_1 \times \frac{[(1+t)^P - 1]}{t}$$

3. ESTUDO DE CASO

Nesta seção é apresentado um estudo de caso, analisando-se o cálculo do FV através dos dois métodos recomendados pelo DNER. Verifica-se que se FE no método (a) for determinado a partir dos "conjuntos de eixo", chega-se aos mesmos valores do método (b). No estudo de caso apresentado, assume-se o FE calculado a partir tanto dos “conjuntos de eixo” como dos "eixos individuais" para exemplificar a magnitude da discrepância quando das duas considerações.

Para iniciar o procedimento, precisa-se dos dados de uma pesquisa classificatória de tráfego. Estas pesquisas são geralmente realizadas em 72 horas (três dias consecutivos), gerando, ao fim, a média semanal da passagem das diferentes categorias de veículo. A média pode ainda ser considerada como uma média diária a ser multiplicada por um fator de correção semanal. O valor médio semanal por categoria de veículo deve então ser corrigido pelos fatores de correção sazonal (mensal e anual). Tem-se ao fim o chamado VMDa (Volume Médio Diário anual).

Os valores de VMDa por categoria de veículo no exemplo analisado a seguir são os seguintes: 2C = 140; 3C = 196; 2S2 = 9; 2S3 = 115; 3S3 = 15, perfazendo um VMDa total de 475. Note que não foram considerados os veículos leves na contagem de tráfego. Portanto, FV será determinado para a frota de veículos comerciais. Conseqüentemente, a determinação do número N deverá levar em conta somente o VMDa da frota comercial.

Para cada categoria de veículo (5 categorias no exemplo em questão), determina-se o peso por conjunto de eixo. Pode-se considerar ainda uma tolerância nestes pesos, uma vez que a Lei no. 7408/85 permite até 7,5% de excesso sobre os pesos máximos (5% sobre o peso bruto total, ou seja, todos eixos não podem ter excesso de 7,5% simultaneamente). Os veículos 2C possuem uma carga de 6 tf no eixo dianteiro (Conjunto de Eixo 1 ou CE1) e 10 tf no eixo traseiro (CE 2). No

caso do 3C, o conjunto de eixo 2 possui um eixo traseiro duplo com um total de 17 tf. Os semi-reboques (2S2, 2S3, 3S3) possuem três conjuntos de eixo. Os valores dos pesos de todos os conjuntos de eixo das categorias analisadas são apresentados na Tabela 5. A partir destes valores determina-se os FEC_j correspondentes a cada conjunto de eixo, que podem ser calculados diretamente das expressões fornecidas na Tabela 1, também indicados na Tabela 5.

Tabela 5: Pesos por conjunto de eixo em cada categoria de veículo

Categoria	Pesos por Conjunto de Eixo			FEC_j		
	CE1	CE2	CE3	CE1	CE2	CE3
2C	6 tf	10 tf	-	0,278	3,289	-
3C	6 tf	17 tf	-	0,278	8,549	-
2S2	6 tf	10 tf	17 tf	0,278	3,289	8,549
2S3	6 tf	10 tf	25,5 tf	0,278	3,289	9,300
3S3	6 tf	17 tf	25,5 tf	0,278	8,549	9,300

Até este momento, os procedimentos necessários para o cálculo do FV pelos dois métodos de determinação sugeridos pelo DNER são idênticos. A partir deste ponto, entretanto, é que se passa propriamente a fazer o cálculo do FV.

3.1 Método (a) – $FV = FE \times FC$

Em função do número de veículos por categoria (VMDa) e dos seus respectivos números de eixo, pode-se determinar o Fator de Eixo (FE) da frota em questão como uma média ponderada. Considerando os "eixos individuais", o número total de eixos que operam na via relativo a cada categoria é obtido multiplicando o número de "eixos individuais" daquela categoria pelo respectivo VMDa da categoria (Tabela 6). No exemplo em questão, existem 140 eixos dianteiros simples de roda simples e 140 eixos traseiros simples de roda dupla correspondentes aos veículos 2C. Somando-se todos os "eixos individuais" das cinco categorias chega-se a 1.569 eixos (n) para um VMDa de 475 (V_t). Portanto, $FE = n/V_t = 1.569/475 = 3,3$. Quando se considera "conjuntos de eixo", $n = 1.089$ e, conseqüentemente, $FE = n/V_t = 1.089/475 = 2,3$, portanto, bastante inferior.

Tabela 6: Dados para determinação do FE

Categoria	VMDa	No. Eixos Individuais	No. Eixos Individuais \times VMDa	No. Conj. Eixos	No. Conj. Eixos \times VMDa
2C	140	2	280	2	280
3C	196	3	588	2	392
2S2	9	4	36	3	27
2S3	115	5	575	3	345
3S3	15	6	90	3	45
	475		1.569		1.089

O cálculo do número total de "conjuntos de eixo" é reproduzido na Tabela 7. O número correspondente a cada conjunto de eixo nas diversas categorias refere-se ao VMDa daquela categoria. O próximo passo no procedimento de cálculo de FV é multiplicar as células da Tabela 7 referentes a n_j pela respectiva célula na Tabela 5 correspondente ao FEC_j . Os resultados destas multiplicações são apresentados nas três últimas colunas da Tabela 7.

A soma dos subtotais referentes a cada conjunto de eixo, ou seja, $\sum (n_i \times FEC_j)$, dividida pelo número total de “conjuntos de eixos” (1.089) representa o Fator de Carga (FC) da frota, semelhantemente ao que foi apresentado na Tabela 2. No exemplo acima, $4.090/1.089 = 3,8$. O Fator de Veículo (FV) é dado por $FC \times FE$. Considerando FE a partir dos “conjuntos de eixo”, tem-se, $3,8 \times 2,3 = 8,6$. Considerando FE a partir dos “eixos individuais”, tem-se, $3,8 \times 3,3 = 12,4$. Nota-se a grande discrepância de resultados quando das duas considerações. Reforça-se que apenas na primeira os parâmetros possuem a mesma base conceitual, ou seja, são calculados a partir dos “conjuntos de eixo”. Considerando $FE = 3,3$ e calculando-se FC como $\sum (n_i \times FEC_j)/$ número total de “eixos individuais”, ou seja, $4.090/1.569 = 2,6$, tem-se $FV = 2,6 \times 3,3 = 8,6$. Neste caso o cálculo do FC estaria misturando parâmetros relativos aos “conjuntos de eixo” com o número de “eixos individuais” de modo a compatibilizá-lo com o FE calculado incorretamente. Trata-se de uma forma não incomum de uso indevido no meio técnico brasileiro.

Tabela 7: Dados para cálculo de FV a partir de “conjuntos de eixo”

Categoria	No. de conjuntos de eixo (n_i)			$n_i \times FEC_j$		
	CE1	CE2	CE3	CE1	CE2	CE3
2C	140	140	-	39	461	-
3C	196	196	-	54	1.676	-
2S2	9	9	9	3	30	77
2S3	115	115	115	32	378	1.069
3S3	15	15	15	4	128	139
Subtotal	475	475	139	132	2.672	1.286
Total	1.089			4.090		

3.2 Método (b) –
$$FV = \frac{\sum (P_i \times FV_i)}{100}$$

No caso do segundo método nas recomendações do DNER, o FV é determinado para cada categoria de veículo. Parte-se dos FEC_j da Tabela 5, reproduzidos na Tabela 8 para facilitar a compreensão. O FV_i para cada categoria é simplesmente a soma dos FEC_j para cada conjunto de eixo daquela categoria. O conceito de FE não é usado neste caso. Este procedimento considerando o FV por categoria surgiu no Brasil a partir de Queiróz (1982) em adição ao procedimento até então adotado, que considerava o conceito de FV para a frota de veículos como um todo (Souza, 1966).

Tabela 8: Determinação dos FV_i para cada conjunto de eixo de cada categoria de veículo

Categoria	CE1	CE2	CE3	FV_i
2C	0,278	3,289	-	3,567
3C	0,278	8,549	-	8,827
2S2	0,278	3,289	8,549	12,116
2S3	0,278	3,289	9,300	12,867
3S3	0,278	8,549	9,300	18,127

A partir dos FV_i e das porcentagens relativas a cada categoria de veículo (P_i) tiradas diretamente dos respectivos VMDa's, obtêm-se o FV da frota comercial pela fórmula acima. A Tabela 9 apresenta os números relativos a este cálculo, chegando-se a um $FV = 861,08/100 = 8,6$. Note

que este valor é igual ao valor calculado pelo método (a) desde que sejam considerados “conjuntos de eixos” para o cálculo de FE naquele caso.

Tabela 9: Determinação de FV a partir de FV_i

Categoria	VMDa	P_i (%)	FV_i	$P_i \times FV_i$
2C	140	29,47	3,567	105,14
3C	196	41,26	8,827	364,22
2S2	9	1,89	12,116	22,96
2S3	115	24,21	12,867	311,52
3S3	15	3,16	18,127	57,24
	475	100		861,08

3.3 Cálculo do número N

O efeito da diferença do FV no cálculo do número N para o exemplo em questão pode ser observado abaixo. Considera-se uma taxa anual de crescimento geométrico de tráfego $t = 3\%$, e um período de projeto $P = 10$ anos:

- Método (a): $FV = 12,4 \Rightarrow N = 2,5 \times 10^7$ (FE de eixos individuais)
- $FV = 8,6 \Rightarrow N = 1,7 \times 10^7$ (FE de conjuntos de eixo)
- Método (b): $FV = 8,6 \Rightarrow N = 1,7 \times 10^7$

Os autores identificaram que existem em uso ainda outros métodos de determinação de N que levam a resultados diferentes dos métodos descritos acima. Como exemplo, cita-se um procedimento que considera o FC para categorias de veículo combinadas, ou seja, um FC_i calculado a partir dos eixos dos veículos 2C e 3C, e outro FC_i calculado a partir dos eixos dos reboques e semi-reboques. Neste caso, calcula-se FE também para cada categoria combinada, tendo-se FE_i . Apesar de observado em projetos, não há referência na literatura deste método. Os autores acreditam que a falta de clareza nas recomendações existentes leva consultores e órgãos rodoviários a adotarem variações metodológicas que produzem resultados distintos. Daí a importância dos esclarecimentos contidos no presente trabalho com o objetivo de tornar único no Brasil o procedimento de cálculo de parâmetros fundamentais de tráfego usados no dimensionamento e gerenciamento de pavimentos.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentadas e discutidas em detalhe as diferentes metodologias para determinação de FV contidas nas recomendações do DNER em uso no Brasil. Tais recomendações, bem como a literatura nacional antiga e recente, não são, na opinião dos autores, suficientemente claras com respeito ao cálculo do FE. Destacou-se a importância de se considerar o conceito de “conjunto de eixo” e não de “eixo individual” na determinação do referido fator. Foi feita uma contextualização histórica indicando que o primeiro conceito é o originalmente considerado no desenvolvimento do método de dimensionamento hoje em uso no Brasil. A falta de clareza nos textos de pavimentação tem induzido freqüentemente a comunidade a resultados de parâmetros de tráfego distintos mesmo quando partindo de dados de entrada iguais, além de dar margem a variações metodológicas que podem causar ainda mais confusão no meio técnico. Apesar de tratar-se de um tema já bastante discutido, e supostamente bem compreendido, os autores consideram que é tarefa da comunidade acadêmica atingir um consenso metodológico a

fim de que seja claramente aplicado nos trabalhos técnicos e científicos no país. Só assim resultados de estudos em localidades distintas poderão ser apropriadamente comparados.

Agradecimentos

Os autores agradecem a equipe envolvida no projeto “Pesagem de Veículos de Carga no Estado do Ceará (DERT/ASTEF/UFC)” pelas importantes discussões sobre os parâmetros de tráfego. O primeiro autor faz um agradecimento especial ao Prof. Felipe Loureiro do PETRAN/DET/UFC, que revisou este artigo e levantou diversos aspectos bastante relevantes que contribuíram para a clareza do trabalho.

Referências Bibliográficas

- AASHTO (1972) Guide for design of pavement structures. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- AASHTO (1993) Guide for design of pavement structures. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- ABCP (1998) Dimensionamento de pavimentos rodoviários e urbanos de concreto pelo método da PCA/1984. Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo.
- Albano, J.F. (1998) Efeitos da variação da carga por eixo, pressão de inflação e tipo de pneu na resposta elástica de um pavimento. 138p. Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre.
- ASTEF (2001) Pesagem de veículos de carga no Estado do Ceará. Relatório Final da Associação Técnico Científica Engenheiro Paulo de Frontin – ASTEF para o DERT- Ceará.
- Boyd, W.K. e Foster, C.R. (1950) Design curves for heavy multiple-wheel assemblies, development of CBR flexible pavement design methods for airfield. ASCE Transactions, Vol. 115, 534-546.
- Deacon, J.A. (1969) Load equivalency in flexible pavements. AAPT, Vol. 38, 465-491.
- DNER (1996) Manual de pavimentação. Departamento Nacional de Estradas e Rodagens, Rio de Janeiro.
- DNER (1989) Manual de dimensionamento de pavimentos rígidos – método PCA 1966, 1984. Departamento Nacional de Estradas e Rodagens, Rio de Janeiro.
- DNER (1998) Manual de reabilitação de pavimentos asfálticos. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, Rio de Janeiro.
- FAA (1995) Airport pavement design for the Boeing 777 airplane - Advisory Circular - AC 150/5320-16
- Fernandes Jr., J.L. (1994) Investigação dos Efeitos das Solicitações do Tráfego sobre o Desempenho de Pavimentos. Tese de Doutorado, EESC-USP.
- Foster, C.R. e Ahlvin, R.G. (1954) Stresses and deflections induced by a uniform circular load. HRR, Vol. 33
- GEIPOT (1977) Relatório Intermediário: Resultados e análises preliminares - Pesquisa ICR, Brasília, DF.
- Hallin, J.P. (2000) 2002 Guide for the design of new and rehabilitated pavements – Traffic input requirements. Apresentação disponibilizada na *internet*, NCHRP 1-37A.
- Menezes, E.S., Sales, E.P., Pessoa, L.L. e Costa, V.S. (1988) Comentários e avaliações sobre as pesagens de veículos em Pernambuco. 23ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Florianópolis.
- Motta, L.M.G. (1991) Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis; Critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas. Tese de doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Pereira, A.M. (1985) Análise crítica dos fatores de equivalência adotados pelo DNER e sua adequação às rodovias de tráfego pesado. Tese de Doutorado, UFPR, Curitiba, PR.
- Pereira, D.A.M. (1992) Contribuição ao estudo dos fatores de equivalência de cargas. Tese de MSc, USP, São Paulo.
- Queiróz, C.A.V. (1981) Performance Prediction Models for Pavement Management in Brazil. PhD Dissertation, The University of Texas at Austin.
- Queiróz, C.A.V. (1982) Uma avaliação das conseqüências econômicas da restrição aos excessos de carga por eixo. 17ª Reunião Anual de Pavimentação, Brasília, DF.
- Sales, E. P., Salles Sobrinho, J. F. e Gondim, Y. C. (1987) Pesagens de veículos na região Norte e Nordeste -Análise e recomendações. 22ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Maceió.
- Senço, W. (1997) Manual de técnicas de pavimentação. Ed. PINI.
- Soares, J.B., Oliveira Jr., J.A. e Loureiro, C.F.G. (2001) Análise de viabilidade econômica de um sistema de pesagem de veículos de carga na malha rodoviária do Estado do Ceará, Brasil. Segundo Simpósio Internacional de Manutenção e Restauração de Pavimentos e Controle Tecnológico, Auburn, Alabama.
- Souza, M.L. (1961) Método de projeto de pavimentos flexíveis, DNER, Rio de Janeiro.

- Souza, M.L. (1966) Método de projeto de pavimentos flexíveis, DNER, Rio de Janeiro.
- Souza, M.L. (1981) Método de projeto de pavimentos flexíveis, DNER, Rio de Janeiro.
- Treybig, H.J. e Von Quintus, H.L. (1976) Equivalency factor analysis and prediction for triple axles - Report BR2/1- Austin Research Engineers, Texas.
- Turnbull, W., J., Foster, C.R. e Ahlvin, R.G. (1962) Design of flexible pavements considering mixed loads and traffic volume. International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements Proceedings. University of Michigan, Ann Arbor, Estados Unidos.