

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
COMISSÃO DE GRADUAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

Douglas Cardoso Engelke

**CARACTERIZAÇÃO DA FROTA RODANTE COMERCIAL
NAS RODOVIAS FEDERAIS BRASILEIRAS E O IMPACTO
DOS CARREGAMENTOS DOS VEÍCULOS**

Porto Alegre

Julho 2019

DOUGLAS CARDOSO ENGELKE

**CARACTERIZAÇÃO DA FROTA RODANTE COMERCIAL
NAS RODOVIAS FEDERAIS BRASILEIRAS E O IMPACTO
DOS CARREGAMENTOS DOS VEÍCULOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de
Graduação do Curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia
da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos
requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Lélío Antônio Teixeira Brito

Porto Alegre

Julho 2019

DOUGLAS CARDOSO ENGELKE

**CARACTERIZAÇÃO DA FROTA RODANTE COMERCIAL
NAS RODOVIAS FEDERAIS BRASILEIRAS E O IMPACTO
DOS CARREGAMENTOS DOS VEÍCULOS**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pelo Professor Orientador e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 11 de julho de 2019

BANCA EXAMINADORA

Prof. Lélío Antônio Teixeira Brito (UFRGS)
Ph.D. pela University of Nottingham
Orientador

Prof. Washington Peres Núñez (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Celso Luiz dos Santos Romeiro Júnior (UFRGS)
Me. pelo Instituto Militar de Engenharia

Mara Regina Bianchini (DAER-RS)
Me. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho à Solange e ao Luiz, meus pais, por terem me proporcionado chegar a este momento.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Luiz e Solange, sem os quais nenhuma das minhas conquistas até hoje teriam sido possíveis e, muito menos, a possibilidade de estar prestes a receber o título de engenheiro civil. Agradeço pelo amor, pelo carinho, e pelo respeito que me ensinaram a ter com qualquer pessoa sem nenhuma diferença. Amo muito vocês.

À minha namorada Júlia, que é uma mulher inspiradora e com quem divido a felicidade da vida. Te amo.

Ao meu orientador, professor Lélío, não só pela ajuda com este trabalho, mas pelo suporte oferecido ao longo dos anos, principalmente pelo programa PETER, e por ter me apresentado a área da pavimentação, pela qual me apaixonei e pretendo me dedicar para melhorar as condições da infraestrutura rodoviária do Brasil.

A todos e todas que passaram pelo LAPAV, local onde não só aprendi sobre pavimentos, como também sobre amizade, respeito e busca por um mundo melhor. Preciso citar aqui pessoas como o Vinícius Alves e o Rodrigo da Silva pelos grandes ensinamentos de vida que me deram durante esta jornada no laboratório.

Aos meus amigos, os da engenharia, os do Dohms, os do LAPAV, os de Long Beach e os encontrados pelo caminho da vida, pois para mim eles são como família, são irmãos. São aqueles com os quais divido os piores e os melhores momentos da vida e que estão sempre presentes de alguma maneira. Aqueles que me ensinam sobre privilégios, sobre empatia, sobre fraternidade e que me incentivam a me tornar uma pessoa melhor. Gostaria de citar todos aqui, entretanto a vida foi tão generosa na quantidade de pessoas especiais e amáveis que apareceram no meu caminho que não os citarei para não cometer a injustiça de esquecer de alguém. Vocês sabem que eu amo todos vocês.

A todos os professores que passaram por mim em algum momento da minha vida, pois a sua profissão é a mais importante do mundo, única capaz de tornar esse planeta um lugar melhor para se viver e menos desigual.

Por fim, à Universidade Federal do Rio Grande do Sul, instituição que me orgulha, pela grande mudança proporcionada na minha vida, pessoal e profissional, e que me permitiu aprender que o mundo é muito maior do que se possa imaginar.

Sonho com o dia em que todos levantar-se-ão e compreenderão que foram feitos para viverem como irmãos.

Nelson Mandela

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo caracterizar a frota rodante comercial das rodovias federais brasileiras e avaliar o impacto dos seus carregamentos através de dados do Plano Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT) do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). O PNCT disponibiliza contagens volumétricas de tráfego das rodovias federais brasileiras, e, também, através da Pesquisa Nacional de Tráfego (PNT), contagens classificatórias dos veículos. Com essas informações, foi possível dividir as rodovias em diferentes níveis de tráfego através do volume médio diário comercial e da quantidade de tipos de eixos. Para cada um dos níveis considerados, avaliou-se quais as classes de veículos e quais os tipos de eixos de maior ocorrência. Além da classificação dos veículos, construiu-se cenários de carregamento com o objetivo de calcular o número N para 10 anos de vida útil do pavimento através da metodologia da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) e da metodologia da *United States Army Corps of Engineers* (USACE) indicadas pelo DNIT. Verifica-se que as classes de veículos de maior incidência são a 3C, a 2C e a 3S3, cuja representatividade chega a 50% de todas as classes independente do volume de tráfego. Quanto aos tipos de eixos, o Eixo Simples Roda Simples (ESRS) e o Eixo Tandem Duplo (ETD) representam cerca de 40% e 30% da ocorrência em todos os níveis de tráfego. A avaliação por eixos demonstra que a frequência de cada tipo não depende do volume de tráfego, mesmo que exista diferentes classes de veículos, o somatório dos tipos de eixo permanece constante. A avaliação do número N demonstra que, através da metodologia da USACE, os cenários com sobrecarga são superiores a qualquer outro, enquanto que pela metodologia da AASHTO, apenas o cenário com todos os veículos carregados supera algumas condições de sobrecarga. Quanto aos valores calculados seguindo a metodologia do Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo, os valores de tráfego aproximam-se de um carregamento de 70% a 80% da frota na carga máxima legal (CML) sem considerar sobrecarga. Este trabalho demonstra a importância da continuidade das contagens volumétricas e classificatórias, e da pesagem, cujos dados fornecem base para caracterização do tráfego brasileiro assim como conferem maior confiabilidade aos estudos e considerações utilizadas no cálculo do número N em projetos de pavimentos.

Palavras-chave: Contagem de Tráfego. Classes de Veículos. Eixos.
PNCT. Número N.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tolerâncias na pesagem – resumo histórico de leis. Fonte: Estudo CCR “Estudo do Efeito das Alterações na Legislação de Tolerância de Cargas Rodoviárias nos Pavimentos” (LAPAV, 2019)	15
Figura 2 - Geometria dos eixos comerciais (DNIT, 2012).....	17
Figura 3 - Geometria do Eixo Duplo Direcional (DNIT, 2012)	17
Figura 4 - Geometria do Eixo Especial (DNIT, 2012).....	17
Figura 5 - Ocorrência das classes de veículos em cada grupo	32
Figura 6 - Ocorrência do tipo de eixo em cada grupo.....	32
Figura 7 - Grupo A - Evolução Número N pela USACE para 10 anos de projeto	33
Figura 8 - Grupo B - Evolução Número N pela USACE para 10 anos de projeto.....	33
Figura 9 - Grupo C - Evolução Número N pela USACE para 10 anos de projeto.....	34
Figura 10 - Grupo 1 - Evolução Número N pela USACE para 10 anos de projeto	34
Figura 11 - Grupo 2 - Evolução Número N pela USACE para 10 anos de projeto	35
Figura 12 - Grupo 3 - Evolução Número N pela USACE para 10 anos de projeto	35
Figura 13 - Grupo A - Evolução Número N pela AASHTO para 10 anos de projeto	36
Figura 14 - Grupo B - Evolução Número N pela AASHTO para 10 anos de projeto	36
Figura 15 - Grupo C - Evolução Número N pela AASHTO para 10 anos de projeto	36
Figura 16 - Grupo 1 - Evolução Número N pela AASHTO para 10 anos de projeto	37
Figura 17 - Grupo 2 - Evolução Número N pela AASHTO para 10 anos de projeto	37
Figura 18 - Grupo 3 - Evolução Número N pela AASHTO para 10 anos de projeto	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Equações dos Fatores de Equivalência de Carga do método da USACE (DNIT, 2006)	18
Tabela 2 - Equações dos Fatores de Equivalência de Carga do método da AASHTO (DNIT, 2006)	18
Tabela 3 - Rodovias retiradas do PNCT e PNT para o estudo	27
Tabela 4 - Exemplo dos veículos da rodovia BR-020/CE diariamente	28
Tabela 5 - Divisão pelo VMD_c	29
Tabela 6 - Divisão pelo número de eixos.....	29
Tabela 7 - Valores das cargas na CML e na tara.....	30
Tabela 8 - Correspondência classes do trabalho com DER-SP (2006).....	31
Tabela 9 - Resumo dos cenários para cálculo do Número N pela USACE e pela AASHTO	31

LISTA DE SIGLAS

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials

AI – Asphalt Institute

CML – Carga Máxima Legal

CONTRAN – Conselho Nacional de Trânsito

DER-SP – Departamento Estradas de Rodagem de São Paulo

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

EDD – Eixo Duplo Direcional

EE – Eixo Especial

ESRD – Eixo Simples Rodas Duplas

ESRS – Eixo Simples Rodas Simples

ETD – Eixo Tandem Duplo

ETT – Eixo Tandem Triplo

FEC – Fator de Equivalência de Carga

FHWA – Federal Highway Administration

FV – Fator Veicular

HS WIM – High Speed Weigh-in-motion

PBT – Peso Bruto Total

PNCT – Plano Nacional de Contagem de Tráfego

PNT – Pesquisa Nacional de Tráfego

PPVM – Posto de Pesagem Veicular Móvel

USACE – United States Army Corps of Engineers

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

VMD – Volume Médio Diário

VMD_c – Volume Médio Diário Comercial

WIM – Weigh-in-motion

LISTA DE SÍMBOLOS

P – peso (tf)

N_a – número equivalente de aplicações do Eixo Padrão, durante o ano a

i – categoria do veículo, variando de 1 a k

V_{ia} – volume de veículos diários da categoria i , durante o ano a do período de projeto

c – percentual de veículos comerciais na faixa de projeto

FV_i – fator veicular da categoria i

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1 CONSIDERAÇÕES PARA CÁLCULO DO NÚMERO N	16
2.2 SOLICITAÇÕES NOS PAVIMENTOS E AS CARGAS A SEREM CONSIDERADAS	19
2.3 USO DA TECNOLOGIA <i>WEIGH-IN-MOTION</i> (WIM) E A SOBRECARGA	21
2.4 PLANO NACIONAL DE CONTAGEM DE TRÁFEGO	24
3 DADOS E METODOLOGIA	25
4 RESULTADOS	31
5 CONCLUSÃO	38
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

1. INTRODUÇÃO

O desempenho adequado de um pavimento depende de diversos fatores. Pode-se citar o modo de execução, a escolha dos materiais a serem utilizados, o controle da execução, uma correta manutenção, uma drenagem adequada, entre outros. Um aspecto fundamental é o carregamento ao qual o pavimento será submetido durante sua vida útil, dado que, como em qualquer estrutura, conhecer os carregamentos é a base inicial para a elaboração de um projeto.

Nos pavimentos, os veículos são os responsáveis pelos diferentes tipos e dimensões de carregamentos. Dessa forma, é importante saber todo o tráfego existente em uma rodovia, seja para efetuar uma manutenção ou uma duplicação. Sabe-se que os veículos leves, carros e motos, não exercem nenhum tipo de carregamento significativo para o dimensionamento de pavimentos; dessa forma, interessa-se apenas pelos veículos chamados de comerciais, os ônibus e os caminhões.

A primeira questão para a execução de um projeto de pavimento é o volume de veículos esperado na rodovia para o período de projeto. A segunda é que peso cada um desses veículos estará transportando. Para sanar essas questões, em condições ideais, deveria ser feita uma contagem de tráfego e uma pesagem por um período que resultasse em uma confiabilidade alta dos dados levantados. A qualidade dos dados é importante para que se conheça de maneira acurada o tipo, a frequência e o carregamento de cada veículo que passa pela rodovia. Sabemos que muitas vezes obter uma confiabilidade alta é difícil e, mesmo que fosse possível, ainda estaríamos sujeitos a cometer erros, visto que oscilações na economia podem levar a variação das características das frotas (peso e volume), ainda mais em países em desenvolvimento, como o Brasil, cuja economia é fortemente dependente do cenário político nacional e internacional.

Devido às dificuldades envolvidas em uma contagem volumétrica-classificatória, tradicionalmente premissas precisam ser feitas. Comumente, os departamentos de estrada de rodagem brasileiros, se valem destas simplificações sugerindo composições de carga pré-estabelecidas registradas a partir dos fatores-veículo por categorias de veículos. Esta consideração simplifica a contagem volumétrica-classificatória que dispensa uma maior granularidade na avaliação dos diferentes veículos comerciais.

Em alguns cenários, a disponibilidade de contagem por um pequeno período, implica em extrapolar variações sazonais. A exemplo, campanhas de levantamento durante ou fora de

períodos de grandes safras em regiões de produção agrícola ou pecuária, adicionam uma grande incerteza dentro das projeções, se não for tratada adequadamente.

Um dos obstáculos no dimensionamento de pavimentos é a escolha de que cargas devem ser consideradas. Mesmo que as contagens de tráfego existissem de maneira rotineira, há uma dificuldade na obtenção dos carregamentos, além da existência de sobrecarga. A obtenção dos carregamentos poderá ter uma solução em um futuro próximo, mesmo que ainda hoje exista um número limitado de balanças operando durante todo os dias do ano. Existem tecnologias, como o *Weigh-in-motion* que permitem conhecer os pesos dos veículos através da instalação de sensores nos pavimentos. Entretanto, a sobrecarga nos veículos parece ser um problema mais complicado de ser resolvido.

O dimensionamento de pavimentos não admite a consideração de sobrecarga nos veículos. Além disso, a flexibilidade relacionada à sobrecarga vem aumentando desde o final do século passado aliada à falta de fiscalização nas rodovias brasileiras. Existem diferentes limites de tolerância relacionados aos pesos existentes em cada eixo do veículo, aos pesos brutos totais (PBT) e aos pesos para transbordo da carga. Esses valores vêm aumentando com o tempo, conforme Figura 1.

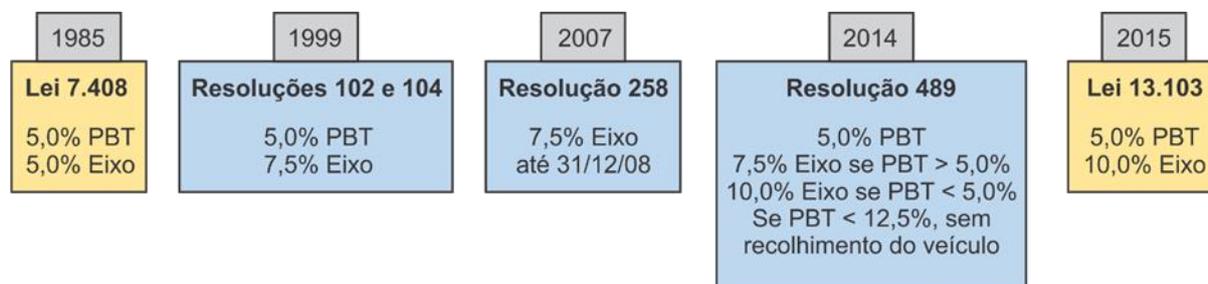


Figura 1: Evolução das tolerâncias nas cargas máximas legais por eixo e aos pesos brutos totais (PBT), no Brasil, nas últimas décadas (LAPAV, 2019)

Dentro desse contexto, quanto maior a disponibilidade de informações, como também o avanço de estudos sobre esses temas, melhores serão as possibilidades de qualificarmos as considerações para o dimensionamento de pavimentos. Entre as possibilidades, está uma caracterização da frota rodante nas rodovias brasileiras além do desenvolvimento de trabalhos que demonstrem o impacto da sobrecarga. Muitos trabalhos vêm sendo desenvolvidos com esses objetivos há muito tempo. Dessa forma, esse trabalho visa contribuir com essas discussões com o objetivo de classificar os veículos comerciais rodantes nas rodovias federais do Brasil

através dos dados disponíveis dentro do Plano Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT) e da Pesquisa Nacional de Tráfego (PNT). Através da separação em diferentes níveis de volume de tráfego, pretende-se demonstrar quais as classes de veículos e quais os eixos que têm uma maior ocorrência, além de avaliar o Número N de projeto de pavimentos para diferentes composições de carregamento.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Considerações para cálculo do Número N

O Volume Médio Diário Total (VMD) corresponde ao número total de veículos que trafegam em uma rodovia durante um ano dividido pelo número de dias desse ano (DNIT, 2016). O Volume Médio Diário Comercial (VMD_c) é calculado da mesma maneira, entretanto considera apenas os caminhões e os ônibus, por isso a denominação de comercial. Estas classificações são importantes para a distinção entre VMD Total e VMD Comercial, uma vez que os veículos comerciais são aqueles que interessam no dimensionamento de pavimentos, já que os veículos leves não causam danos significativos à estrutura de um pavimento quando comparados aos demais veículos (BALBO, 2007).

Os veículos comerciais que rodam no Brasil estão definidos dentro do quadro de fabricantes de veículos do DNIT (2012). Cada tipo de veículo tem uma composição diferente dos seus eixos, o que culmina numa divisão dos veículos por classes. Entre os veículos classificadas pelo PNT, há a ocorrência de 6 tipos de eixos diferentes: Eixo Simples de Rodas Simples (ESRS), Eixo Simples de Rodas Duplas (ESRD), Eixo Tandem Duplo (ETD), Eixo Tandem Triplo (ETT), Eixo Duplo Direcional (EDD) e o Eixo Especial (EE). Cada um dos eixos tem uma determinada carga máxima legal (CML), estabelecidos pela Resolução do Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN) nº 210/06, que pode ser colocada nos eixos. Para o ESRS a carga máxima é de 6,0 toneladas, para o ESRD o peso máximo é de 10,0 toneladas, para o ETD é 17,0 toneladas e para o ETT é 25,5 toneladas. O EDD tem como limite o valor de 12,0 toneladas, e o EE tem como limite o valor de 13,5 toneladas. As configurações dos eixos são mostradas nas Figuras 2, 3 e 4.

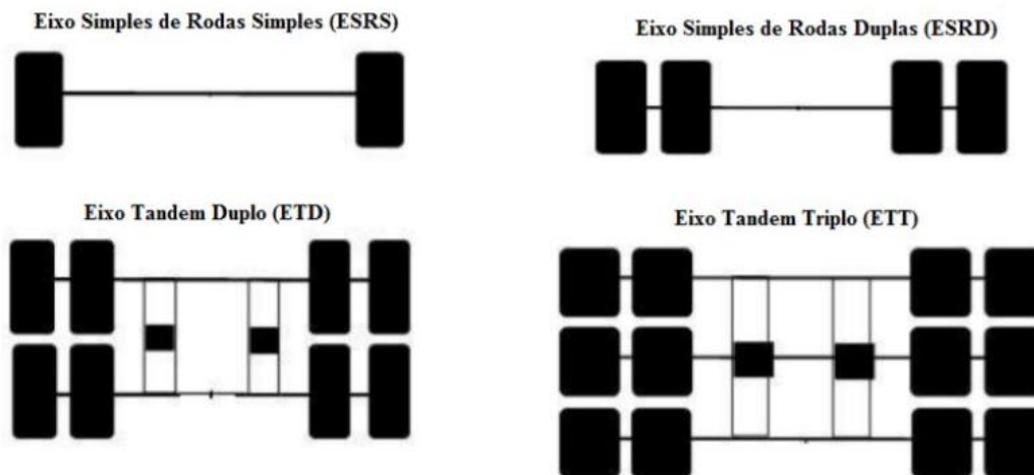


Figura 2: Geometria dos eixos comerciais (DNIT, 2012)

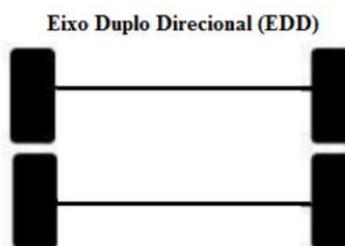


Figura 3: Geometria do Eixo Duplo Direcional (DNIT, 2012)

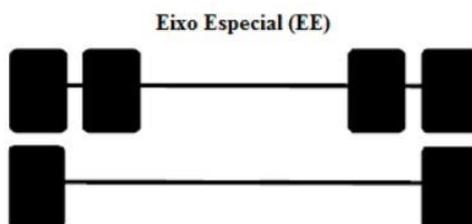


Figura 4: Geometria do Eixo Especial (DNIT, 2012)

O valor máximo permitido de carregamento para cada veículo irá depender da sua combinação de eixos através da soma de cada carga permitida por cada um deles. Esses carregamentos serão fundamentais para a determinação do Número N. A Lei nº 13.103, estabelece os limites de tolerância máxima que pode haver nos eixos dos veículos e no peso bruto total (PBT). A dificuldade existente é que essa lei, conhecida também como ‘Lei dos Caminhoneiros’, estabelece níveis de tolerância aos transportadores de carga, entretanto, nos projetos de pavimentos, na maioria das vezes, não se autoriza fazer qualquer consideração de carregamentos acima dos valores estipulados pela CML.

O Número N representa o número de repetições do eixo-padrão que é utilizado como parâmetro de projeto e aponta quantas vezes esse eixo carregará a faixa de rolamento durante toda a vida útil de projeto. O eixo-padrão equivale a um veículo com eixo simples de rodas duplas com 80 kN de carga. Para efetuar o cálculo deste número de repetições, é necessário conhecer o valor equivalente de cada veículo que passa na faixa de tráfego mais solicitada. Como cada veículo tem uma composição de eixos diferente, necessita-se utilizar um fator que quantifique o dano causado no pavimento por cada veículo quando comparado ao eixo-padrão. Esse fator é denominado fator de equivalência de carga (FEC). Para o cálculo do FEC, utiliza-se comumente os valores definidos pelo DNIT (2006) através de simplificações do modelo proposto pela *AASHTO* (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) e do modelo proposto pela *USACE* (*United States Army Corps of Engineers*).

As equações definidas pela *USACE* (Tabela 1) têm como consideração principal o afundamento plástico do pavimento com o intuito de proteger o subleito contra a deformação permanente enquanto a *AASHTO* (Tabela 2) tem como fundamentação a perda de serventia do pavimento (ruptura funcional).

Tabela 1: Equações dos Fatores de Equivalência de Carga do método da *USACE* (DNIT, 2006)

Tipos de eixo	Faixas de Cargas (tf)	Equações (P em tf)
Eixo simples	< 8	$FEC = 2,0782 \times 10^{-4} \times P^{4,0175}$
	≥ 8	$FEC = 1,8320 \times 10^{-6} \times P^{6,2542}$
Eixo tandem duplo	< 11	$FEC = 1,5920 \times 10^{-4} \times P^{3,472}$
	≥ 11	$FEC = 1,5280 \times 10^{-6} \times P^{5,484}$
Eixo tandem triplo	< 18	$FEC = 8,0359 \times 10^{-5} \times P^{3,3549}$
	≥ 18	$FEC = 1,3229 \times 10^{-7} \times P^{5,5789}$

Tabela 2: Equações dos Fatores de Equivalência de Carga do método da *AASHTO* (DNIT, 2006)

Tipos de eixo	Equações (P em tf)
Eixo simples de rodas simples	$FEC = \left(\frac{P}{7,77}\right)^{4,32}$
Eixo simples de rodas duplas	$FEC = \left(\frac{P}{8,17}\right)^{4,32}$
Eixo tandem duplo	$FEC = \left(\frac{P}{15,08}\right)^{4,14}$
Eixo tandem triplo	$FEC = \left(\frac{P}{22,95}\right)^{4,22}$

Com as equações e os carregamentos, é possível descobrir qual o valor do FEC para cada eixo. A soma desses fatores de equivalência de cada veículo resulta no que é denominado fator veicular (FV). Inclusive, muitos departamentos de estradas de rodagem estaduais sugerem a utilização de fatores veiculares pré-determinados em seus manuais. Com esses valores é possível determinar o Número N de projeto para o ano, e com alguma consideração de crescimento anual, calcular o Número N para qualquer horizonte de projeto desejado.

$$N_a = \sum_{i=1}^{i=k} (V_{ia} \times FV_i) \times 365 \times c$$

onde N_a = número equivalente de aplicações do Eixo Padrão, durante o ano a

i = categoria do veículo, variando de 1 a k

V_{ia} = volume de veículos diários da categoria i , durante o ano a do período de projeto

c = percentual de veículos comerciais na faixa de projeto

FV_i = fator veicular da categoria i

2.2. Solicitações nos pavimentos e as cargas a serem consideradas

Saber como atuam os carregamentos dos veículos, assim como quais fatores influenciam na resposta do pavimento a essas solicitações, é de extrema relevância. Albano (1998) constata que não só os excessos de carga nos eixos, como também a pressão de inflação nos pneus dos veículos influencia na resposta elástica de um pavimento. Dentro dos ensaios realizados pelo autor, ele demonstra que tanto para o cálculo de fatores de equivalência de carga pela AASHO como por modelos empírico-mecanísticos, tanto um aumento na carga por eixo quanto também um aumento na pressão de inflação dos pneus, podem causar uma elevação significativa nos fatores e, conseqüentemente, uma diminuição na vida útil do pavimento. Entre o cenário padrão de carregamento e pressão de enchimento dos pneus (82 kN de carregamento e 80 psi de pressão) e o cenário de excesso dos mesmos parâmetros (120 kN de carregamento e 100 psi de pressão), a vida útil do pavimento cai para menos de 25 % tanto pelo FEC calculado pela AASHO como também por modelos empírico-mecanísticos.

Através de experimentos feitos por Albano (2005) no simulador de tráfego existente no Laboratório de Pavimentação da UFRGS (carga por eixo simples de rodado duplo do simulador), é possível registrar reduções na vida útil de pavimentos quando submetidos a uma

sobrecarga de 20%. Com as análises dos fatores de equivalência de carga e através de deflexões medidas e de deflexões calculadas através do software ELSYM5 para pavimentos delgados e espessos, é possível avaliar uma redução da durabilidade prevista nos pavimentos que pode variar entre 38,0% até 73,7%.

Neste mesmo trabalho, através de pesquisa de campo em algumas rodovias, o autor mostra a quantidade de veículos comerciais que trafegam carregados, plenamente ou parcialmente, e os que trafegam vazios. A porcentagem de veículos carregados varia de 64,6% até 75,6 % e a de veículos descarregados varia de 24,4% até 35,4%. Este tipo de análise é relevante, uma vez que para qualquer projeto de construção de um pavimento esses dados influenciam no cálculo do número N.

Dessa forma, o autor considera, em outra parte desse estudo, que 60 % dos veículos carregados trafegam na carga máxima mais a tolerância de 7,5 % por eixo (permitido pela lei no ano do estudo), e 40 % dos veículos carregados trafegam com excesso de 10 % nos eixos dianteiros e 20 % nos eixos restantes. Nessa situação, o fator veicular tem um aumento de mais de 30 % em todas as rodovias. Como não é indicado dimensionar pavimentos com cargas acima da carga máxima legal (CML), esse aumento no FV é uma das causas de ocorrência de uma degradação do pavimento de maneira precoce. Comparando o número N de projeto do dimensionamento na CML com o N recalculado para os FV's com sobrecarga, há uma perda média de 23,0 % da durabilidade da vida útil do pavimento. Albano (2005) também avalia a influência da implantação de fiscalização. A existência de pesagem dentro do trecho provocou um aumento no VMD das rodovias estudadas, uma vez que, para transportar a mesma carga sem infringir a lei, necessita-se de um número maior de veículos.

A vida útil pode diminuir porque diversos efeitos são provocados pelo aumento das solicitações sofridas pelos pavimentos. A deformação permanente é um dos principais problemas existentes nos pavimentos e tende a aparecer nos primeiros anos da vida útil dessas estruturas. A sobrecarga dos veículos é um dos fatores que contribuem para o seu surgimento, uma vez que o dimensionamento de pavimentos e muitas das previsões feitas em laboratórios através da realização de ensaios não consideram a sobrecarga existente nos pavimentos. Santos *et al* (2018) demonstra um aumento expressivo das tensões desvio, mais de 30%, no ponto crítico de deformações viscoplásticas do revestimento asfáltico, conforme aumentam os valores de carregamento para ESRD. Com as tensões desvios obtidas e com simulações executadas no

programa FlexPave 1.0, as sobrecargas dos veículos apontam incrementos máximos de afundamentos de trilha de roda na ordem de 45% para o ESRD para o pavimento como um todo.

Além dos veículos completamente carregados e com sobrecarga, existem muitos veículos que trafegam sem carga alguma. Esses veículos que estão descarregados ainda exercem um esforço ao pavimento uma vez que os seus valores de tara (peso próprio do veículo somado ao peso da carroceria, do combustível, de ferramentas e acessórios), ainda influenciam no desempenho do mesmo. Entretanto, existem poucas referências sobre quais valores devem ser considerados como valor de tara para cada um dos eixos.

Na IP-02/2004 Classificação das Vias (SÃO PAULO (Cidade), 2004), existem alguns valores que podem ser tomados como referência. Para os diferentes tipos de veículos, há diferentes considerações do valor a ser considerado para veículos não carregados. O menor valor considerado para ESRS é de 2,7 toneladas, para o ESRD, o menor valor é de 3,0 toneladas, para o ETD, o menor valor é de 4,5 toneladas e para o ETT, o menor valor é de 8,5 toneladas. De alguma forma, é necessário haver considerações sobre os veículos sem nenhum carregamento, porque eles fazer parte da frota rodante.

2.3. Uso da Tecnologia *Weigh-in-Motion* (WIM) e a sobrecarga

A tecnologia *Weigh-in-motion* (WIM) vem popularizando-se desde a década passada e trazendo diversos benefícios para o estudo de pavimentos. Através da pesagem em movimento é possível saber os carregamentos existentes nos veículos que trafegam pelas rodovias, solicitações essas que são fundamentais para um correto dimensionamento de pavimentos. A tecnologia WIM é uma das grandes novidades no que diz respeito a sistemas de pesagem dinâmicas e vem sido utilizada em vários estudos com a obtenção do espectro de tráfego, que é o percentual de cada veículos comercial (com suas configurações de eixos e cargas) que solicitará o pavimento durante a vida útil de projeto.

Através do estudo de Yousif *et al* (2012), demonstra-se que a obtenção do espectro de tráfego é essencial para a utilização de modelos de previsão de desempenho de pavimentos. Através da obtenção das cargas reais dos veículos é possível obter, a partir de modelos, valores de deformações por cisalhamento, valores de deflexões, deformações na parte inferior da camada de revestimento e no topo do subleito causadas por cada carga que solicita o pavimento.

Brito e Bock (2013) estudaram o espectro de cargas na BR-290/RS com a utilização da técnica WIM. Através dessa tecnologia foi possível agrupar os veículos das rodovias por número de eixos, demonstrando que os veículos de 2 e 3 eixos são maioria no tráfego (25,63% e 27,99%), que as outras composições com 4, 5 e 6 eixos tem participação parecida, cerca de 14% do tráfego e, por último, que os veículos com mais de 7 eixos ocorrem em escala muito menor. Nas cinco semanas de coleta de dados obtida pelo estudo, quase 10% dos veículos trafegaram com sobrecarga em algum dos eixos. O maior percentual de sobrecarga encontrada foi no segundo eixo, já a segunda maior sobrecarga é encontrada no primeiro eixo, cuja concentração de cargas é mais significativa, uma vez que o eixo é composto por apenas dois pneumáticos.

Brito (2015) e Bock (2016) utilizaram o WIM de alta velocidade para obter o estudo de tráfego da rodovia BR-290/RS. Os autores apresentam as dificuldades da tecnologia, como a instalação do sistema e a sua operacionalização para garantir o correto levantamento de dados sem perdas. Apesar dessas dificuldades, avanços relevantes foram feitos nesse estudo. Com a dificuldade de se manter em operação os postos de pesagem existentes nas rodovias, o WIM aparece como uma boa solução. A operação inconstante das balanças fixas dificulta a obtenção dos carregamentos reais da rodovia, assim como não fiscaliza a sobrecarga rodante. Os autores demonstraram que a tecnologia tem boa confiabilidade quando comparada à das balanças de precisão que atuam durante todo o dia, mostrando-se útil para a obtenção dos carregamentos e das classes dos veículos que trafegaram na rodovia.

Esse estudo WIM da BR-290/RS apresenta valores de cargas médias nos eixos dentro dos limites legais: 4.220 kgf para os ESRS, 7.401 kgf para os ESRD, 14.974 kgf para os ETD e 22.459 para os ETT. Entretanto, constataram-se valores elevados de sobrecarga. O ESRS apresentou 15,7% dos seus eixos com uma sobrecarga média de 17,9%. Já o ESRD apresentou 10,3% de eixos com uma sobrecarga média de 22,0%. As sobrecargas médias mais altas foram encontradas nos ETD e ETT. O ETD tem 20,0% dos seus eixos sobrecarregados com uma média de 44,4% de sobrecarga e, por fim, o ETT tem 1,6% dos eixos sobrecarregados com um excesso de peso médio de 38,5%.

Bock e Brito (2018) analisam a diferença entre o posto de pesagem veicular móvel (PPVM) e um sistema de pesagem dinâmica de alta velocidade HS-WIM (*High Speed Weigh-in-Motion*) implantados na rodovia BR-290/RS. Através de um estudo comparativo, constata-se a capacidade de monitoramento e pesagem de um maior número de veículos comerciais através

da tecnologia WIM (90% dos veículos comerciais da rodovia) frente à pesagem convencional (menos de 10 % dos veículos comerciais da rodovia passaram no posto de pesagem), uma vez que há uma dificuldade de recursos no Brasil para que a fiscalização ocorra de maneira constante. Não fosse suficiente a quantidade de veículos que não são fiscalizados, através deste estudo é possível constatar que a falta de fiscalização acarreta uma maior incidência de infrações cometidas pelos veículos rodantes. Valores de sobrecarga no PBT passaram de 2,4% observados no PPVM para 6,7% no WIM, e o percentual de veículos com algum excesso nos eixos passou de 10,5% no PPVM para 24,4% no WIM. Além disso, os excessos verificados por grupo de eixos demonstram valores mais expressivos.

Bosso (2018) utiliza a tecnologia WIM para a coleta de dados da BR-381/SP para a caracterização volumétrica, classificatória e o espectro de cargas da rodovia durante o período de 17 meses entre os anos de 2015 e 2017. Dentre as conclusões obtidas do estudo, verifica-se algumas extremamente relevantes para o assunto da sobrecarga nas rodovias. Os eixos com um maior número de veículos com sobrecarga são o ESRS e o ETT (15,8% e 15,6% respectivamente). Nesses mesmos eixos, a maioria dos excessos ocorre em até 10% a mais do que permite a carga máxima legal (CML), mostrando um entendimento de que muitos transportadores consideram o valor de 10% de sobrecarga estipulado como tolerância na lei, como um ganho real de peso para o transporte. No ESRS além de eixos com cargas acima dos 10% de tolerância, uma quantidade significativa de veículos excede mais de 20% do limite legal, como também acontece no ETT.

Durante todo o período de pesquisa, o autor monitorou um total de quase 1.400.000 veículos, resultando em quase 4.000.000 de eixos. Dentro de todo esse universo de veículos, cerca de 23,7% estavam com carregamentos acima da CML. Outro ponto importante a destacar é a quantidade de dados levantados pela tecnologia WIM, volume que seria difícil de se obter de uma rodovia com os recursos escassos que são investidos na fiscalização de cargas no Brasil. O estudo demonstra também que certas categorias de veículos que trafegam com sobrecarga têm uma certa preferência por horário e dia que utilizam a rodovia, demonstrando assim que, se não houver fiscalização durante todo o tempo, a maioria dos veículos sobrecarregados não serão detectados e devidamente penalizados.

Quanto à degradação do pavimento, Bosso (2018) demonstra que, se os veículos trafegassem dentro do limite legal, a estrutura monitorada suportaria os carregamentos por seis meses a mais

do que o cenário real de 12 meses com base em modelos de vida de fadiga. Quando comparadas apenas as diferenças no cálculo do número N, a configuração de cargas do estudo teria um aumento de 32% (USACE) e 23% (AASHTO) se fosse respeitada a carga máxima legal. Mesmo que fosse considerada a tolerância de 10% permitida pela lei, ainda haveria um aumento de 14% (USACE) e 12% (AASHTO) nas solicitações.

2.4. Plano Nacional de Contagem de Tráfego

O cálculo do número de repetições do eixo-padrão é essencial para o dimensionamento de pavimentos, sendo assim é necessário que se tenha o conhecimento de quais veículos trafegam na rodovia para que seja possível a execução de um projeto de maneira adequada. Por consequência, uma pesquisa de contagem de tráfego demonstra-se essencial. Dentro desse contexto, existe uma disponibilidade de dados relevante das rodovias federais brasileiras através do Plano Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT).

O PNCT é realizado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e tem como objetivo caracterizar o comportamento do tráfego nas rodovias federais do Brasil. O PNCT teve início em 1975, sendo paralisado em 2001 e retomado no ano de 2014. Através dos estudos realizados ao longo dos últimos anos, os dados obtidos oferecem uma variedade de informações que podem ser usadas em diferentes aspectos relacionados à construção, à manutenção e à administração das rodovias brasileiras.

A quantidade de informações geradas por essas pesquisas faz parte do que chamamos de *big data*. Cada veículo é uma informação, e, dentro de um conjunto que avalia contagem de tráfego de rodovias com quantidades de veículos que podem variar de 500 veículos até 100.000 veículos diários, a quantidade de dados disponibilizados é muito grande. Por muito tempo uma quantidade expressiva como essa podia ser considerada praticamente impossível de ser avaliada, entretanto, nos dias de hoje, diversas ferramentas nos permitem organizar e analisar esse grande volume de dados provenientes de contagens de tráfego com o intuito de melhorar o nosso conhecimento sobre o que acontece nas rodovias e assim realizar estudos que possam acrescentar nas diversas discussões existentes dentro do campo rodoviário.

As contagens de tráfego têm como objetivo classificar os veículos e obter o VMD que trafegam em cada ponto analisado. O PNCT classifica os veículos em 11 categorias: passeio, ônibus e caminhão de 2 eixos, ônibus e caminhão de 3 eixos, caminhão de 4 eixos, caminhão de 5 eixos,

caminhão de 6 eixos, caminhão de 7 eixos, caminhão de 8 eixos, caminhão de 9 eixos, moto e outros. Com essas informações, é possível obter o VMD_c de cada ponto pesquisado, entretanto não é possível distinguir as classes dos veículos e nem o tipo de eixo de cada uma das categorias.

Apesar de haver uma cobertura de mais de 300 pontos, alguns deles não têm as informações completas. Em muitos locais não foi efetuada a contagem em todos os dias do ano, o que pode acarretar erros de análise dependendo do tipo de estudo a ser feito.

Dentro do PNCT, acontece a Pesquisa Nacional de Tráfego (PNT), que foi realizada nos anos de 2011, 2016 e 2017. Ela ocorre durante a Semana Nacional de Pesquisa de Tráfego (duas vezes por ano) e realiza dois tipos de pesquisas: volumétrica classificatória e origem e destino. A pesquisa volumétrica classificatória identifica as classes de veículos que trafegam na rodovia, e a pesquisa de origem e destino especifica o local de origem e destino de cada um deles.

Mota *et al* (2018) atesta a importância da contagem volumétrica do tráfego através da análise de dimensionamento de pavimentos com dados de pedágio de uma concessionária, cujas categorias de veículos são agrupadas por números de eixos. Há uma diferenciação bem grande na determinação do tráfego (número N) dependendo de quais categorias do DNIT são usadas no enquadramento feito pela concessionária para o pagamento do pedágio. Na análise feita por Mota *et al* (2018), a diferença entre os N projetados para um período de 15 anos é de mais de 100%, utilizando tanto a metodologia da AASHTO como a da USACE. Através dos modelos de previsão de fadiga do Asphalt Institute (AI) e do Federal Highway Administration (FHWA), constata-se a diferença de 1 cm de camada de revestimento asfáltico dependendo das categorias utilizadas para avaliação. Demonstra-se, assim, a importância de ter uma classificação volumétrica representativa dos veículos comerciais que utilizam as rodovias.

3. DADOS E METODOLOGIA

Para este trabalho, as informações necessárias estão contidas nas contagens de tráfego realizadas através do PNCT entre os anos de 2014 e 2017 em mais de 300 pontos espalhados em pontos específicos de diversas rodovias federais por todo o país. Para minimizar erros, foram considerados apenas pontos onde há uma quantidade de informações significativa para avaliação, que, nesse caso, representa uma contagem realizada em um número expressivo de dias no ano.

A premissa considerada foi a de utilizar pontos de rodovias que apresentam valores de contagem em pelo menos 300 dias em um dos anos entre 2014 e 2017 e de pelo menos 200 dias no ano de 2017. Isso foi feito porque dessa forma consideram-se as rodovias que têm uma alta confiabilidade nos dados, uma vez que a cobertura é quase total dentro de um ano.

O ano base para a comparação do VMD_c é o de 2017. Para as rodovias que têm mais de 300 dias de contagem nesse ano, considerou-se o próprio VMD_c registrado pelo PNCT. Para as demais rodovias, que continham 200 dias de contagem no ano de 2017, mas que mostravam mais de 300 dias em algum dos anos anteriores, expandiram-se os valores para o ano base através da análise da sazonalidade no ano de maior cobertura.

A sazonalidade foi definida através da relação entre os meses de um mesmo ano de tráfego, dessa forma cada mês de cada rodovia teria um fator condicionado a um determinado mês. Com esses fatores e, considerando que o comportamento do tráfego tende a seguir a mesma lógica em diferentes anos, é possível determinar o volume de tráfego para o ano base mesmo quando não há uma cobertura de contagem para a totalidade dos dias de um ano.

Para avaliar as classes dos veículos, utilizou-se a pesquisa volumétrica classificatória da PNT, uma vez que há a necessidade de conhecer as classes dos veículos que trafegam nas rodovias que não são disponibilizadas pelo PNCT. As classes presentes no PNT são: 2CB, 2C, 3CB, 3C, 3DC, 2S1, 4CB, 4C, 4CD, 2C2, 2S2, 3S1, 2C3, 3C2, 2S3, 3S2, 3S3, 3C3, 3Q4, 3D4, 3T4, 3V5, 3T6, 3R6, 3M6. Para esse estudo, utilizou-se apenas os anos de 2016 e 2017 da PNT.

Há uma incompatibilidade de localização em muitos dos pontos do PNT e do PNCT. Em muitos deles, há uma diferença de distância, em tantos outros não há relação nenhuma. Dessa forma, avaliou-se todas as localidades do PNCT, e essas foram comparadas com os locais disponíveis no PNT. Alguns pontos são compatíveis em ambos, um total de 36. Entretanto, avaliou-se a necessidade de obter-se um maior banco de dados. Assim, considerou-se aqueles locais que não eram distantes mais do que 30 km e nem tivessem VMD_c com uma diferença superior a 30% no sentido de maior tráfego entre os dois bancos de dados. Isso totalizou em um universo de 58 pontos avaliados em 17 estados diferentes do Brasil, conforme Tabela 3.

Tabela 3: Rodovias retiradas do PNCT e PNT para o estudo

Estado	Rodovia	km	Estado	Rodovia	km	Estado	Rodovia	km
AC	BR-364	km 067	MG	BR-262	km 117	PR	BR-277	km 012
BA	BR-101	km 110	MG	BR-262	km 573	PR	BR-369	km 021
BA	BR-324	km 590	MG	BR-262	km 627	RJ	BR-116	km 306
CE	BR-020	km 074	MG	BR-365	km 481	RJ	BR-356	km 014
CE	BR-116	km 051	MG	BR-381	km 266	RJ	BR-393	km 158
CE	BR-116	km 318	MG	BR-381	km 443	RN	BR-405	km 106
ES	BR-101	km 059	MG	BR-381	km 511	RO	BR-364	km 204
ES	BR-262	km 020	MG	BR-381	km 668	RO	BR-364	km 348
GO	BR-020	km 013	MG	BR-381	km 751	RS	BR-153	km 452
GO	BR-060	km 204	MG	BR-452	km 216	RS	BR-153	km 583
GO	BR-153	km 071	MG	BR-494	km 042	RS	BR-293	km 219
GO	BR-153	km 372	MS	BR-262	km 015	SC	BR-101	km 013
GO	BR-364	km 057	MS	BR-262	km 561	SC	BR-101	km 154
MG	BR-040	km 145	MS	BR-267	km 034	SC	BR-101	km 273
MG	BR-040	km 500	MT	BR-158	km 698	SC	BR-153	km 091
MG	BR-040	km 707	MT	BR-163	km 116	SP	BR-459	km 009
MG	BR-050	km 105	MT	BR-174	km 100	TO	BR-153	km 699
MG	BR-050	km 154	PE	BR-232	km 128	TO	BR-153	km 723
MG	BR-116	km 280	PE	BR-232	km 258			
MG	BR-153	km 185	PE	BR-232	km 506			

A utilização do sentido de maior tráfego se deve ao fato de obter o maior VMD_c unidirecional, logo o valor a ser utilizado para projeto. Nas rodovias duplicadas, considerou-se um fator de ponderação de 96% no tráfego, conforme previsto pelo DNIT (2006), uma vez que se deve considerar que nem todos os veículos comerciais trafegam pela faixa mais solicitada, que é a faixa de projeto.

A separação dos veículos existente no PNT foi utilizada para verificar a proporção de cada classe de veículo existente quando comparada com as demais classes que tinham o mesmo número de eixos. Com essa proporção definida, foi possível separar a classificação do PNCT nas classes de veículos existentes no PNT.

Além da divisão por classes, sabendo que cada classe tem uma quantidade específica de ESRS, ESRD, ETD, ETT, EDD e EE, dividiu-se as rodovias pelas quantidades de cada um dos eixos. Mesmo sendo comprovado por Oliveira (2016) que o eixo duplo direcional (EDD) não tem fator de equivalência de carga comparado a dois eixos simples de rodas simples (ESRS), utilizou-se essa premissa para simplificar a separação dos eixos, uma vez que a CML do EDD

é igual a de dois ESRS. Por exemplo, uma mesma rodovia pode ser demonstrada de duas formas, como na Tabela 4 abaixo.

Tabela 4: Exemplo dos veículos da rodovia BR-020/CE diariamente

Classe do veículo	ESRS	ESRD	ETD	ETT	EE	Quantidade de veículos	Quantidade de eixos
2CB	1	1	0	0	0	9,1	18,2
2C	1	1	0	0	0	81,8	163,6
3CB	1	0	0	0	1	7,4	14,8
3C	1	0	1	0	0	34,4	68,8
3DC	1	0	0	0	1	1,9	3,8
2S1	1	2	0	0	0	3,7	11,1
4CB	2	0	0	0	1	6,0	18
4C	1	0	0	1	0	1,2	2,4
4CD	2	0	1	0	0	7,2	21,6
2C2	1	3	0	0	0	0	0
2S2	1	1	1	0	0	4,8	14,4
3S1	1	1	1	0	0	0,0	0
2C3	1	2	1	0	0	0,0	0
3C2	1	2	1	0	0	0,0	0
2S3	1	1	0	1	0	7,0	21
3S2	1	0	2	0	0	6,1	18,3
3S3	1	0	1	1	0	25,2	75,6
3C3	1	1	2	0	0	0,0	0
3Q4	1	4	1	0	0	0,0	0
3D4	1	0	3	0	0	0,0	0
3T4	1	0	3	0	0	11,1	44,4
3V5	1	0	2	1	0	0,0	0
3T6	1	0	4	0	0	9,1	45,5
3R6	1	0	4	0	0	1,5	7,5
3M6	1	0	1	2	0	3,6	14,4
TOTAL						221,1	563,4

Sendo assim, de cada rodovia, é possível obter o VMD_c e o número total de eixos. Do exemplo da Tabela 4, o VMD_c é de 221,1 veículos e o número total de eixos diários é de 563,4 eixos. Dessa forma, as rodovias foram agrupadas através dessas duas métricas.

Para chegar em grupos representativos, dentro de cada conjunto, separou-se as rodovias através de percentis. Os percentis dividem a amostra em 100 partes iguais, e cada percentil indica a porcentagem de dados inferiores existente na amostra. Como existem muitas rodovias com baixo volume de tráfego entre os 58 pontos analisados, avaliou-se utilizar os percentis de 62,5% e de 87,5%, como feito por LAPAV (2019), estudo que também havia número maior de

rodovias com baixo volume. A utilização desses valores de percentis demonstrou-se satisfatória. Os grupos 1, 2 e 3 são para a divisão pelo VMD_c, conforme Tabela 5, e os grupos A, B e C são para a divisão pelo número de eixos, conforme Tabela 6.

Tabela 5: Divisão pelo VMD_c

Grupo 1	Limite inferior (0%)	221
	Média	853
	Limite superior (percentil 62,5%)	1.485
Grupo 2	Limite inferior (percentil 62,5%)	1.485
	Média	2.423
	Limite superior (percentil 87,5%)	3.361
Grupo 3	Limite inferior (percentil 87,5%)	3.361
	Média	4.754
	Limite superior (100%)	6.148

Tabela 6: Divisão pelo número de eixos

Grupo A	Limite inferior (0%)	563
	Média	2.282
	Limite superior (percentil 62,5%)	4.001
Grupo B	Limite inferior (percentil 62,5%)	4.001
	Média	6.883
	Limite superior (percentil 87,5%)	9.665
Grupo C	Limite inferior (percentil 87,5%)	9.665
	Média	13.038
	Limite superior (100%)	16.412

Para cada grupo classificado pelo VMD_c, somou-se a quantidade de veículos de cada uma das classes existentes e avaliou-se a ocorrência de cada classe em cada grupo. Já para os grupos classificados pelo número de eixos, somou-se a quantidade de eixos de cada tipo, avaliando também qual a ocorrência de cada um deles. Além da avaliação da ocorrência das classes e dos tipos de eixos, calculou-se o Número N para cada um dos grupos para diferentes cenários. Essa análise considerou o cálculo através das equações da *AASHTO* e da *USACE* considerando diferentes níveis de carregamento para os valores médios de cada grupo. Considerou-se um crescimento do tráfego anual de 2% e um período de 10 anos de projeto iniciando em 2020.

Os cenários mais simples considerados estipularam porcentagem de veículos carregados e descarregados. Para os veículos carregados, considerou-se a carga máxima legal (CML), e para os veículos descarregados, na tara, considerou-se os valores mínimos para cada eixo que foram encontrados no IP-02/2004 (SÃO PAULO (Cidade), 2004) conforme Tabela 7.

Tabela 7: Valores das cargas na CML e na tara

Eixo	CML (t)	Tara (t)
ESRS	6	2,7
ESRD	10	3
ETD	17	4,5
ETT	25,5	8,5

Os primeiros cenários são: 100% dos veículos carregados, 80% dos veículos carregados e 20% descarregados, 70% dos veículos carregados e 30% descarregados, 10% dos veículos carregados e 90% descarregados. Na sequência, considerou-se dois cenários com sobrecarga: 80% dos veículos carregados com 5 % de sobrecarga e 20 % dos veículos descarregados, além de 80% dos veículos carregados com 10% de sobrecarga e 20 % dos veículos descarregados.

Além desses cenários, buscou-se construir outros com a bibliografia existente. Em um deles, considerou-se os valores médios de cargas encontrados por Brito (2015) e Bock (2016) no estudo utilizando WIM na BR-290/RS. Com este mesmo estudo, construiu-se outra alternativa considerando as porcentagens de veículos sobrecarregados e a sobrecarga média encontrada, além de usar o carregamento médio para os demais veículos.

As cargas médias são: 41,38 kN para os ESRS, 72,58 kN para os ESRD, 146,84 kN para os ETD e 220,25 kN para os ETT. Para a sobrecarga, considerou-se: 15,7% dos ESRS com uma sobrecarga média de 17,9%; 10,3% dos ESRD com uma sobrecarga média de 22,0%; 20,0% dos ETD com uma sobrecarga média de 44,4%; 1,6 % dos ETT com uma sobrecarga média de 38,5%.

O último cenário construído utilizou os valores estipulados pelo Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo (DER-SP) na Instrução de Projeto IP-DE-P00/001 (DER-SP, 2006). Para os grupos de VMD_c, utilizou-se os fatores veiculares (FV) desta normativa, ajustando as categorias existentes na instrução de projeto e nos considerados neste trabalho, conforme Tabela 8. Para os grupos de número de eixos, o autor considerou as cargas de 55 kN para o ESRS, 95 kN para o ESRD, 150 kN para ETD e 235 kN para ETT através da análise das cargas sugeridas pela mesma normativa do DER-SP.

Tabela 8: Correspondência classes do trabalho com DER-SP (2006)

Classe pelo DER-SP (2006)	Classes do trabalho	FV USACE	FV AASHTO
2C (22)	2C	2,78	1,89
3C (20)	3DC	2,28	0,55
3C (22)	3C	5,44	1,27
2S1	2S1	4,09	2,81
2S2	4CB,4C, 4CD, 2C2, 3S1, 2S2	8,70	3,14
2S3	2C3, 3C2, 2S3, 3S2	10,27	3,32
3S3	3S3, 3C3	9,42	1,90
3D4	3Q4, 3D4, 3T4	17,28	4,09
3D6	3T6, 3R6, 3M6	14,02	3,27
Ôn. (2C)	2CB	2,81	1,88
Ôn. (3C)	3CB	2,21	0,71
3D4, 3D6	3V5	15,65*	3,68*

*calculado pela média dos FV's das classes consideradas

Como não havia considerações para o EE, a carga desse eixo foi sempre considerada a permitida pela CML em todos os cenários. Na Tabela 9, encontram-se todos os cenários considerados.

Tabela 9: Resumo dos cenários para cálculo do Número N pela USACE e pela AASHTO

Cenário VMDC	Cenário eixos	Sigla
100% carregados	100% carregados	100c
80% carregados + 20% descarregados	80% carregados + 20% descarregados	80c+20d
70% carregados + 30% descarregados	70% carregados + 30% descarregados	70c+30d
10% carregados + 90% descarregados	10% carregados + 90% descarregados	10c+90d
80% carregados com 5% de sobrecarga + 20% descarregados	80% carregados com 5% de sobrecarga + 20% descarregados	80c5s+20d
80% carregados com 10% de sobrecarga + 20% descarregados	80% carregados com 10% de sobrecarga + 20% descarregados	80c10s+20d
Valores médios de carga WIM BR-290/RS	Valores médios de carga WIM BR-290/RS	Média WIM BR-290/RS
Sobrecarga encontrada nos eixos + valores médios de carga WIM BR-290/RS	Sobrecarga encontrada nos eixos + valores médios de carga WIM BR-290/RS	Sobrecarga WIM BR-290/RS
Fatores veiculares DER-SP	Cargas estipuladas através do DER-SP	DER-SP

4. RESULTADOS

Na Figura 5, demonstra-se a ocorrência das classes de veículos. É possível afirmar que as classes 3C, 2C e 3S3 são as de maior ocorrência independentemente do nível de tráfego da rodovia, além de estarem presentes em proporções muito próximas (cerca de 18%). As classes

2S3, 3T4, 2S2 são as que mais aparecem na sequência e as que apresentam uma maior variação conforme o nível de tráfego. Os veículos 2CB e 4CD exibem uma ocorrência de cerca de 5% em todos os grupos, e, por fim, as demais classes apresentam valores inferiores a 4%.

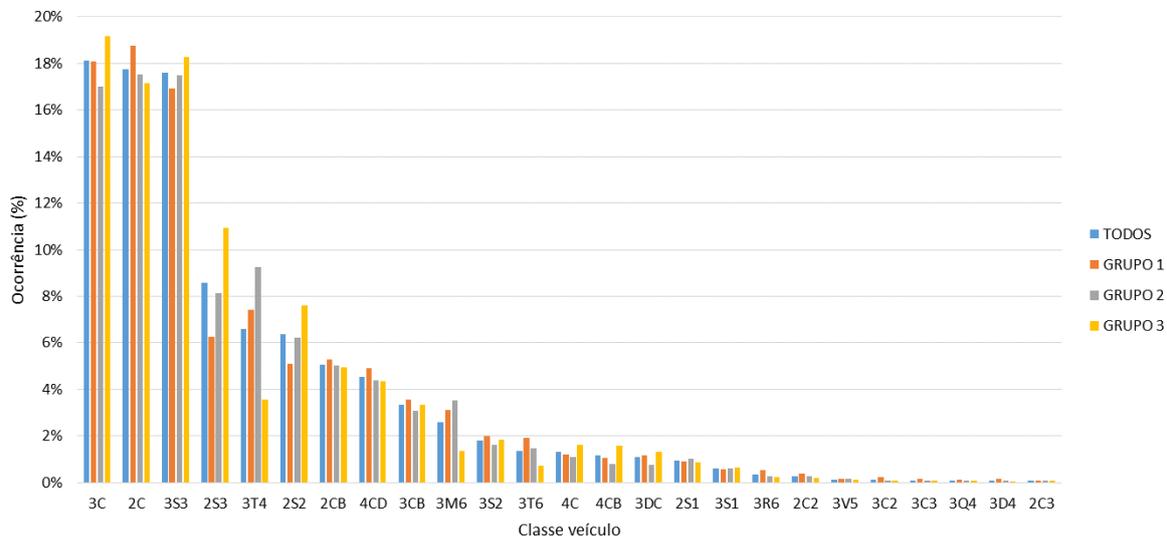


Figura 5: Ocorrência das classes de veículos em cada grupo

Na Figura 6, constata-se que os tipos de eixos têm uma proporção com uma variação muito pequena independentemente do nível de tráfego. Os ESRS e ETD são os eixos que mais ocorrem (cerca de 40% e 30%, respectivamente), seguidos dos ESRD e ETT (cerca de 15% e 12%, respectivamente). Por fim, o EE aparece nas rodovias em cerca de apenas 2% do total.

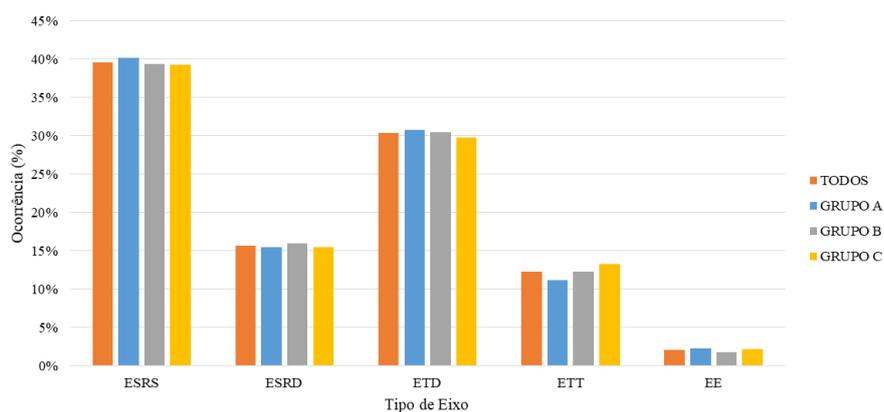


Figura 6: Ocorrência do tipo de eixo em cada grupo

As Figuras 7, 8 e 9 demonstram os valores de N calculados pela metodologia da USACE para os grupos A, B e C. Nos três grupos é possível ver que os cenários com sobrecarga geram valores de N relativamente superiores aos demais cenários.

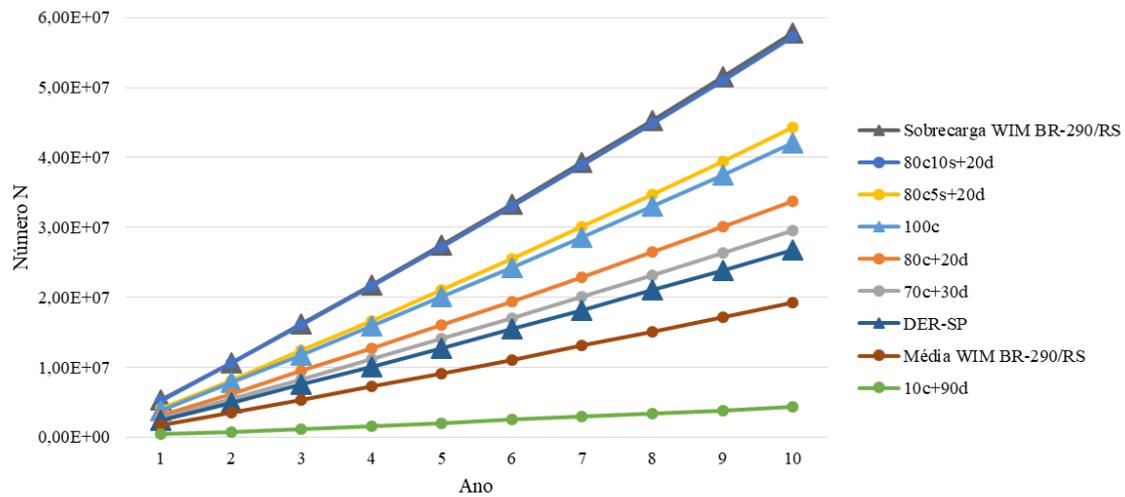


Figura 7: Grupo A - Evolução Número N pela USACE para 10 anos de projeto

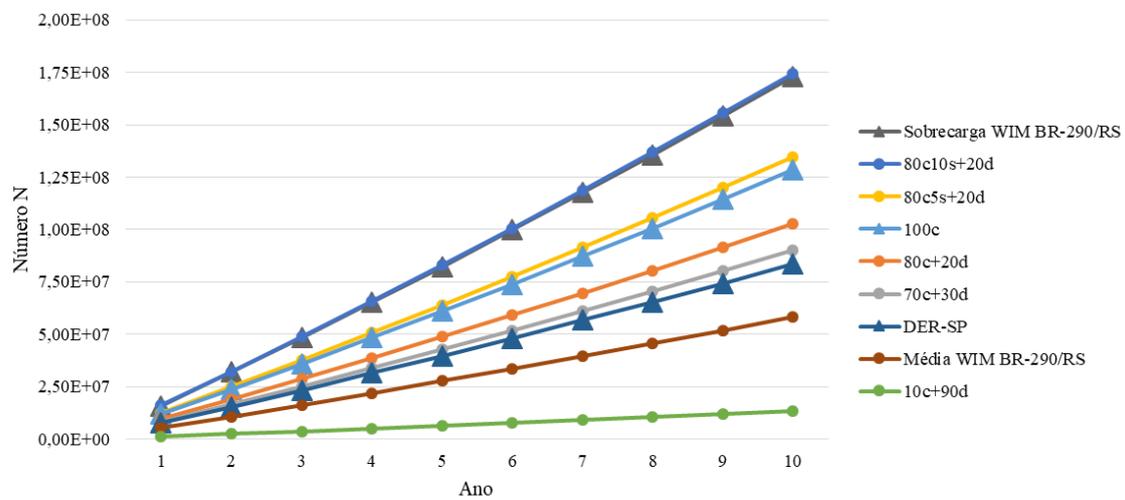


Figura 8: Grupo B - Evolução Número N pela USACE para 10 anos de projeto

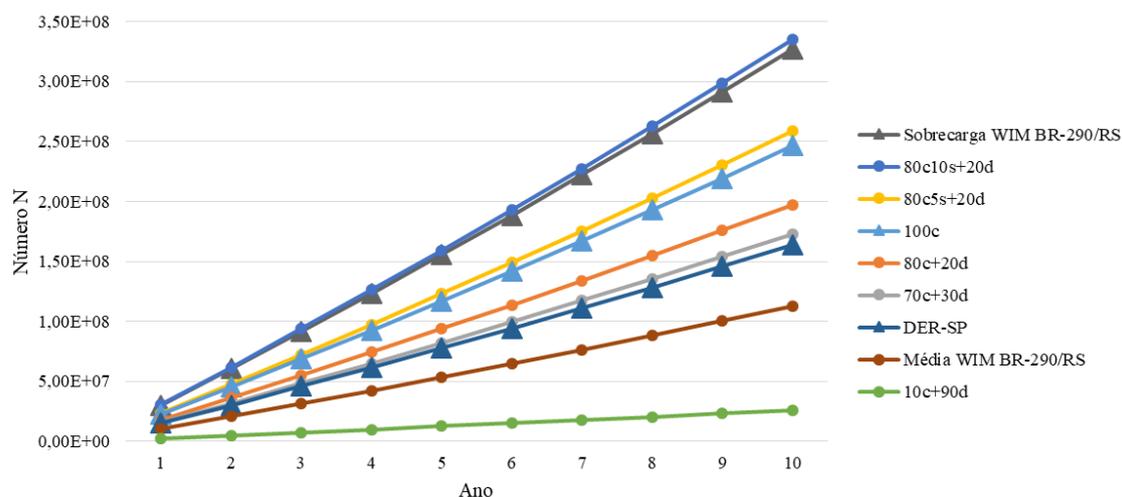


Figura 9: Grupo C - Evolução Número N pela USACE para 10 anos de projeto

O Sobrecarga WIM BR-290/RS e a sobrecarga de 10% tem valores muito próximos. Importante observar que pela metodologia USACE, em todos os grupos, os cenários DER-SP e Média WIM BR-290/RS só não apresentam número N inferior ao cenário com apenas 10% de veículos carregados e 90% dos veículos descarregados, além de que, nesse último cenário, apenas para o menor volume de tráfego não se atingiu um tráfego de 1×10^7 . O DER-SP também apresenta resultados aproximados com os veículos 70% carregados, mas ainda um pouco inferiores.

A mesma coisa acontece para os grupos 1, 2 e 3 utilizando a mesma metodologia, conforme Figuras 10, 11 e 12.

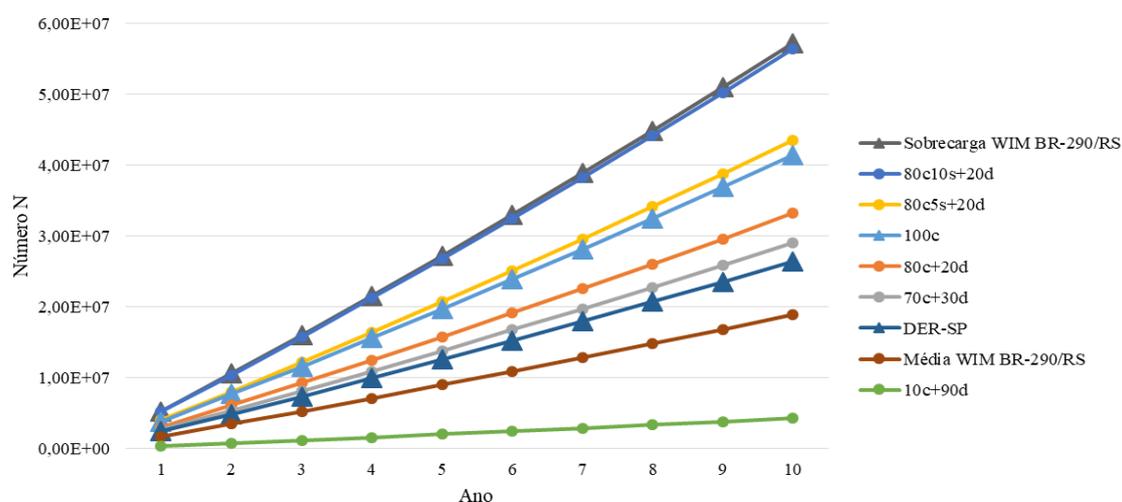


Figura 10: Grupo 1 - Evolução Número N pela USACE para 10 anos de projeto

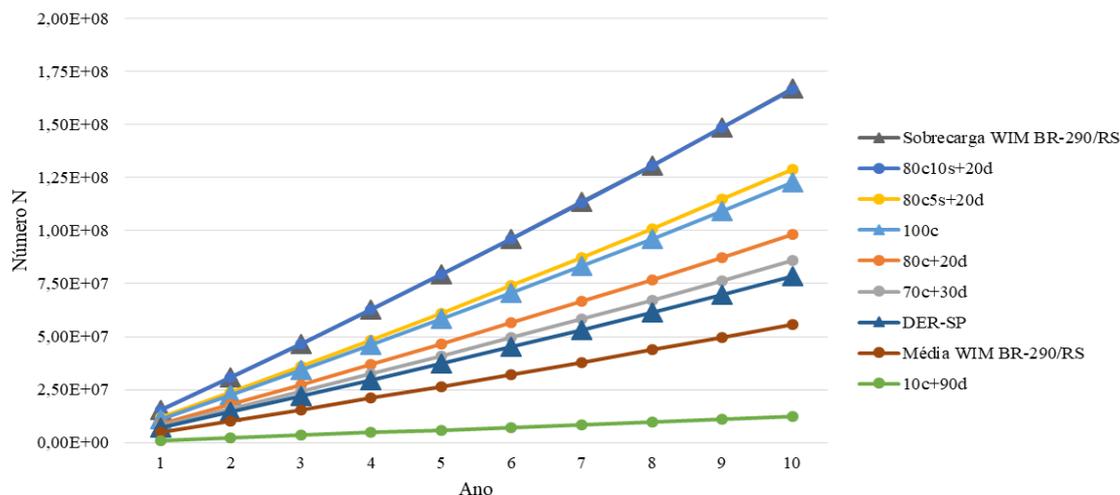


Figura 11: Grupo 2 - Evolução Número N pela USACE para 10 anos de projeto

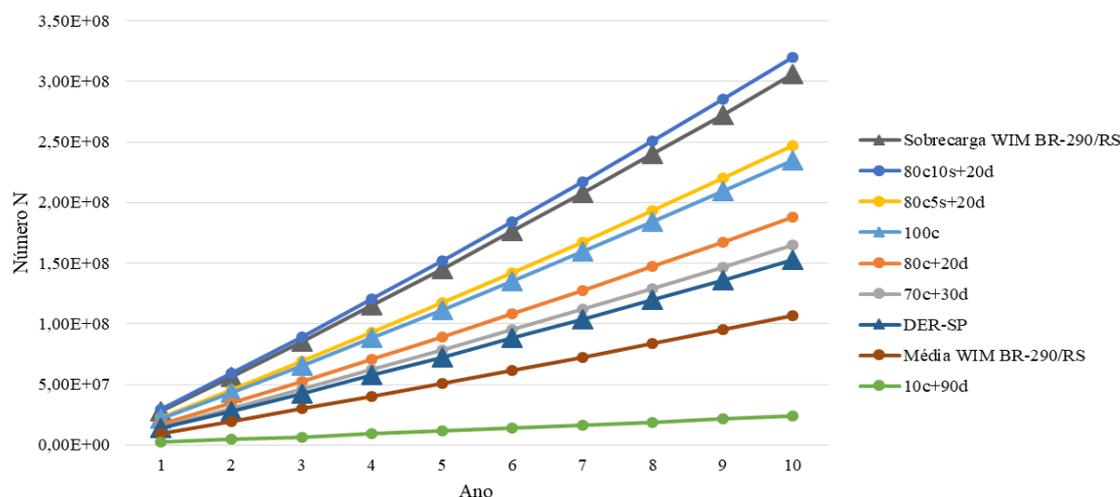


Figura 12: Grupo 3 - Evolução Número N pela USACE para 10 anos de projeto

Pela comparação dos grupos, é possível constatar que a divisão por eixos (grupos A, B e C) apresenta N parecidos com a demonstrada pelo VMDc (grupos 1, 2 e 3).

As Figuras 13, 14 e 15 apresentam os valores de N calculados pela metodologia da AASHTO para os grupos A, B e C. O cenário com 10% de sobrecarga continua sendo o com maior número N, entretanto os veículos 100% carregados tem valores muito próximos do cenário com 5% de sobrecarga. Dessa vez, a Sobrecarga WIM BR-290/RS vem abaixo dos citados anteriormente.

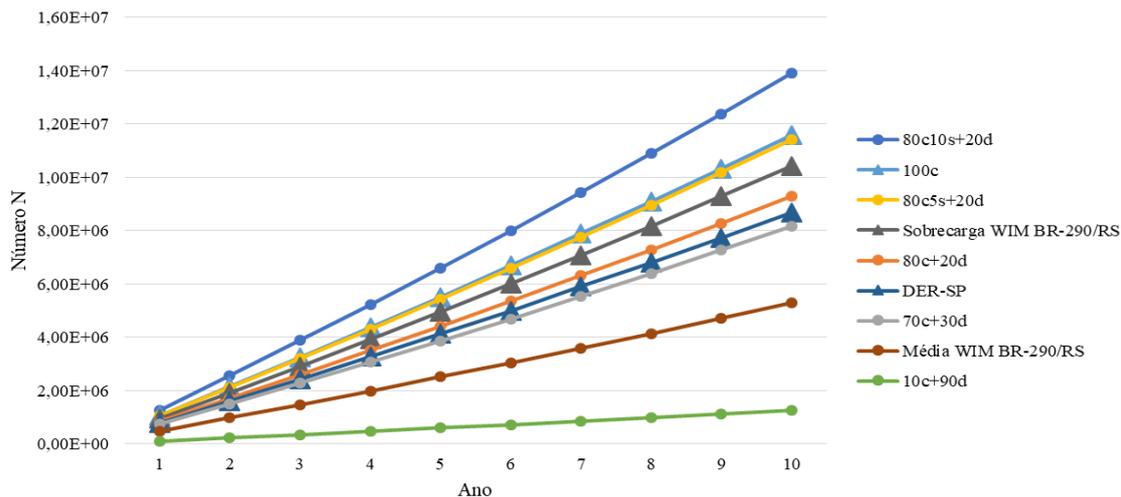


Figura 13: Grupo A - Evolução Número N pela AASHTO para 10 anos de projeto

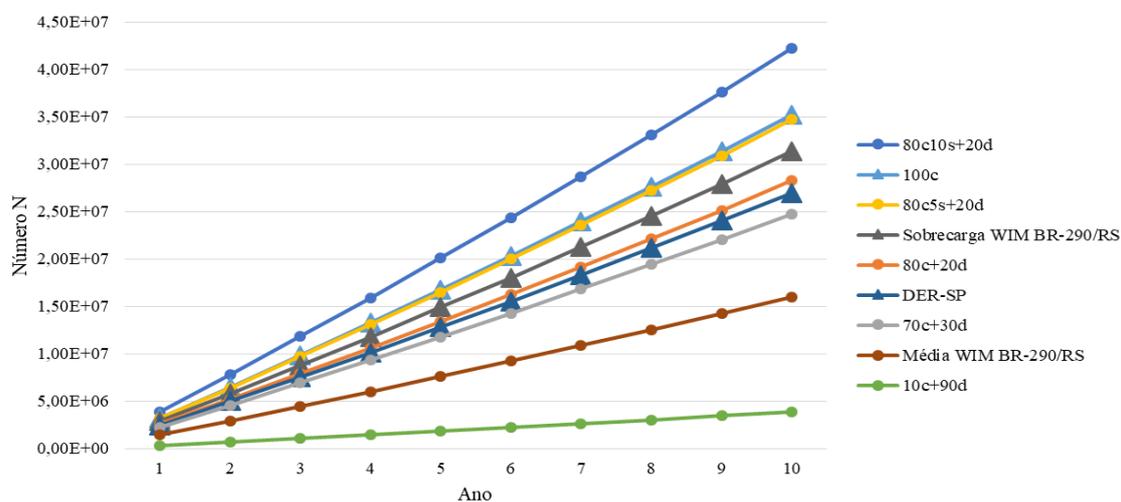


Figura 14: Grupo B - Evolução Número N pela AASHTO para 10 anos de projeto

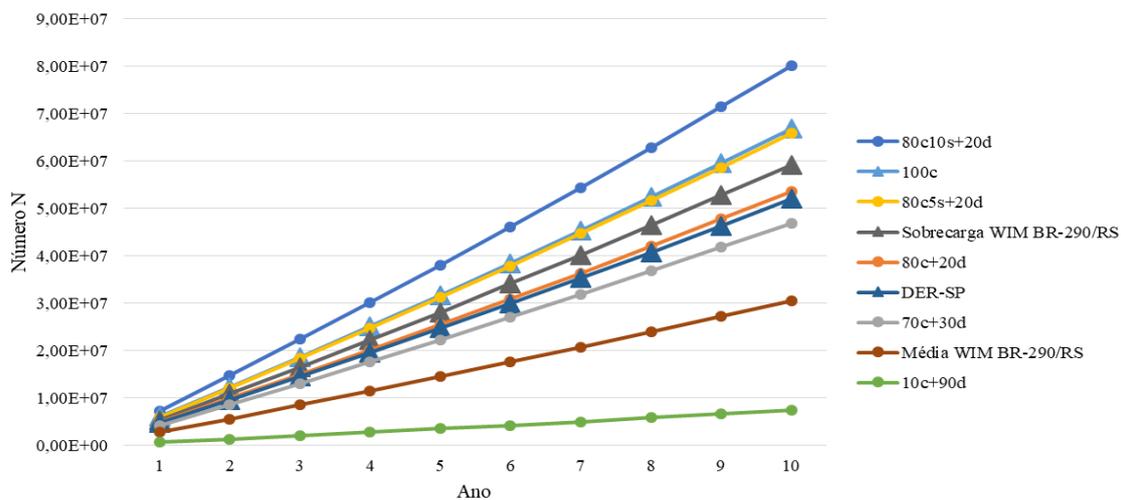


Figura 15: Grupo C - Evolução Número N pela AASHTO para 10 anos de projeto

Diferentemente do que aconteceu na avaliação pela metodologia USACE, o cenário DER-SP alcança valores muito parecidos com a condição de 80% dos veículos carregados e 20% descarregados.

Para os grupos 1, 2 e 3 da metodologia AASHTO, os valores são muito parecidos com os grupos A, B e C, assim como aconteceu para as equações da USACE, entretanto as condições referidas ao DER-SP apresentam número N aproximados com a condição de 70% dos veículos carregados e 30% descarregados, conforme Figuras 16, 17 e 18.

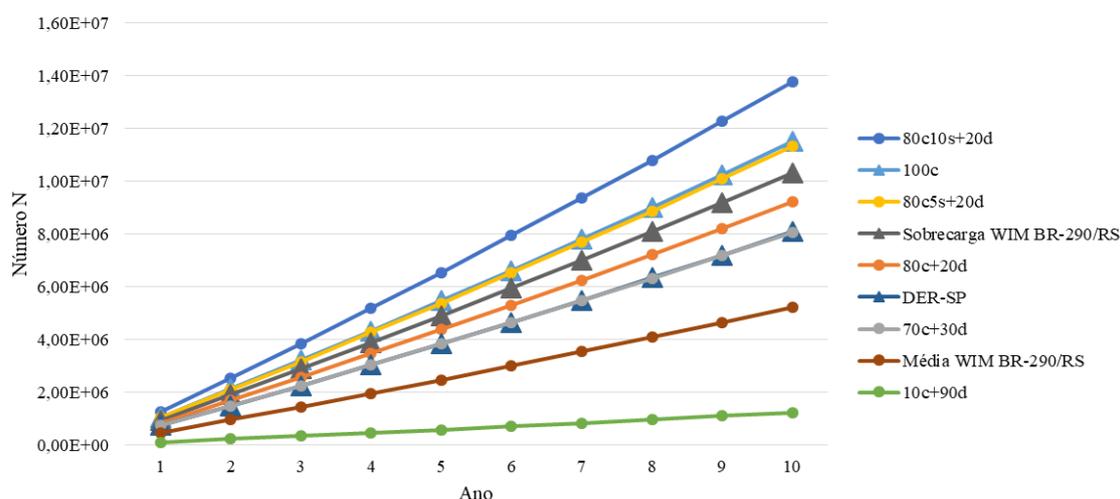


Figura 16: Grupo 1 - Evolução Número N pela AASHTO para 10 anos de projeto

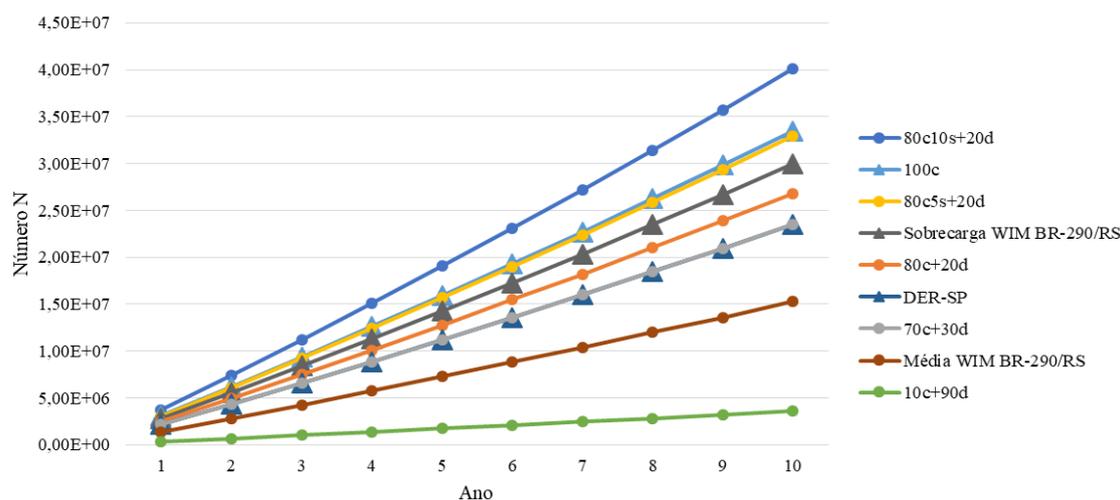


Figura 17: Grupo 2 - Evolução Número N pela AASHTO para 10 anos de projeto

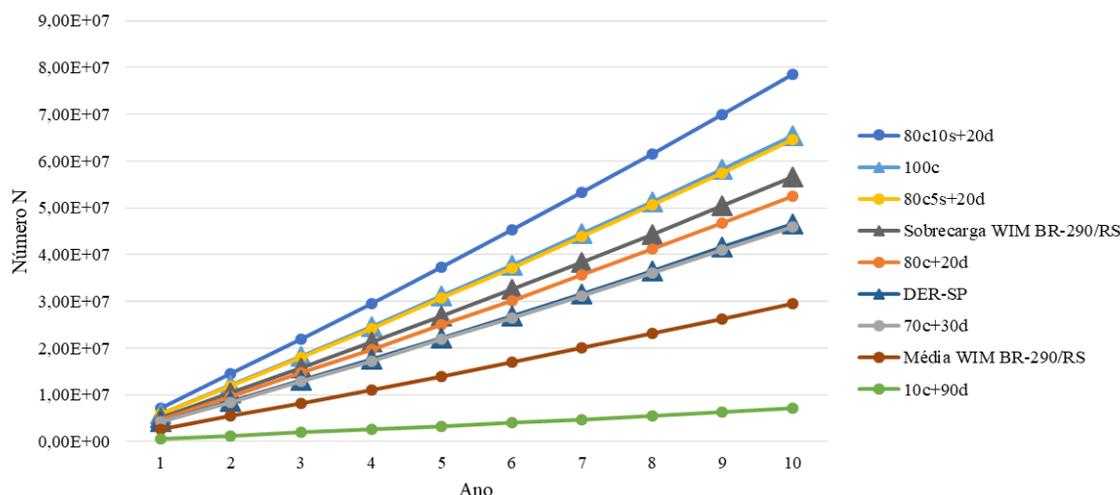


Figura 18: Grupo 3 - Evolução Número N pela AASHTO para 10 anos de projeto

5. CONCLUSÃO

A partir da avaliação dos resultados das ocorrências de veículos e eixos, é possível observar uma homogeneidade mesmo quando se compara volumes de tráfego diferentes. Claro que, quando avaliadas algumas classes de veículos individualmente, alguns valores destoaram de maneira significativa, entretanto, olhando para os tipos de eixos, a diferença entre eles é muito pequena. Esses valores encontrados podem auxiliar ou servir de balizadores na construção de novas rodovias, assim como na manutenção e reabilitação de rodovias existentes onde não seja possível fazer um estudo de tráfego pela limitação de recursos, sejam eles financeiros ou tecnológicos.

Através dos resultados demonstra-se que as classes 3C, 2C e 3S3 são as de maiores ocorrências nas rodovias federais brasileiras utilizadas nesse estudo. Juntas representam mais de 50% das classes rodantes. Na outra extremidade, as classes 3R6, 2C2, 3V5, 3C2, 3C3, 3Q4, 3D4 e 3C3 representam, juntas, menos de 2% do total de veículos comerciais.

Quanto aos eixos encontrados, somente o EE não apresenta valores relevantes, concentrando cerca de 3% do número total de eixos. O ESRS representa quase 40% dos eixos que trafegam nas rodovias e, junto com o ETD, totalizam cerca de 70% dos eixos. Por fim o ESRD e o ETT têm cerca de 15% e 12% de representatividade respectivamente.

Quanto à avaliação dos números N para os cenários construídos, é possível verificar que não basta saber quais veículos e eixos que trafegam em uma rodovia. Os carregamentos dos veículos

são muito importantes. Sem eles, é possível que um pavimento possa vir a ser subdimensionado, uma vez que a sobrecarga é uma realidade no Brasil.

Utilizando a normativa do DER-SP como referência para os demais cenários, verifica-se que somente para os cenários de carga média do WIM da BR-290/RS e para o carregamento de apenas 10% da frota ela estaria prevendo um tráfego superior. Na metodologia AASHTO, que a normativa chega mais perto de um carregamento de 70% ou 80% da frota sem considerar nada de sobrecarga. Pela metodologia USACE, comparando a normativa do estado de São Paulo com os cenários mais agressivos de sobrecarga, WIM BR-290/RS e 10% de sobrecarga, a redução da vida útil de projeto chega a 50%.

O cenário de 100% da frota carregada pela metodologia AASHTO só haveria uma redução, inferior a 20%, na vida útil do projeto quando comparado a uma sobrecarga de 10% em 80% dos veículos carregados. Entretanto, pela metodologia USACE, há um decréscimo que pode chegar perto de 30% nos cenários com um carregamento superior a CML. Dessa forma, é possível constatar que, em muitos casos, mesmo considerando que todos os veículos estão na sua capacidade máxima de carga, a consideração de que toda a frota está no seu peso bruto total máximo não é o suficiente para compensar a sobrecarga existente nas rodovias.

Pelos valores encontrados neste estudo, não seria possível utilizar tratamento superficial em nenhuma rodovia com VMD_c superior ao utilizado para o cálculo do número N do grupo 1, uma vez que todos os valores de tráfego para 10 anos ultrapassam o valor de 1×10^6 , a menos que exista alguma rodovia dentro desse volume de tráfego, na qual menos de 10% da sua frota trafegue na CML sem nenhuma sobrecarga. Para que o número N ficasse próximo de 1×10^6 nessa configuração de carregamento, o VMD_c a ser considerado deveria ser um quarto apenas do utilizado no grupo 1 (aproximadamente 213 veículos comerciais por dia). Demonstra-se que mesmo com um volume baixo de tráfego e com carregamentos muito baixos, o dano ao pavimento ainda é considerável.

Por último, os maiores valores médios de sobrecarga encontrados no estudo WIM BR-290/RS são para os ESRS e ETD, os quais são os eixos de maior ocorrência nas rodovias federais do Brasil, alcançando uma representação de cerca de 70% de toda a frota rodante, o que reforça a necessidade de uma fiscalização mais forte e de uma mudança no projeto de pavimentos, para que, de alguma forma, a sobrecarga possa ser amenizada.

Com um crescimento do investimento em contagens volumétricas e classificatórias, e em pesagem de veículos, a quantidade de dados disponíveis permitirá fornecer uma maior confiabilidade na execução de projetos de pavimentos, assim como uma análise cada vez mais qualificada dos carregamentos reais existentes nas rodovias brasileiras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBANO, J. F. (1998) *Efeito da variação de carga por eixo, pressão de inflação e tipo de pneu na resposta elástica de um pavimento*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS.
- ALBANO, J. F. (2005) *Efeitos dos excessos de carga sobre a durabilidade de pavimentos*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS.
- BALBO, J. T. (2007) *Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração*. Oficina de Textos, São Paulo.
- BRITO, L.A.T., BOCK, A. (2013) *Relatório Final de Pesquisa – Estudo do Espectro de Cargas dos Veículos Comerciais rodantes na BR-290/RS, Freeway, através do uso da técnica do Weigh-in-Motion (WIM)*. Porto Alegre/RS. Abril de 2013. 147p.
- BRITO, L.A.T. (2015) *Relatório Final de Pesquisa – Uso da tecnologia de Weigh-in-Motion (WIM) para avaliação de desempenho de pavimentos asfálticos da BR 290/RS - Freeway*. Porto Alegre/RS. Março de 2015. 298p.
- BOCK, A. (2016) *Pesagem em movimento de cargas atuantes em rodovias e seu impacto no desempenho de pavimentos da rede temática de asfalto*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS.
- BOCK, A., BRITO, L.A.T. (2018) Fiscalização de cargas rodoviárias: estudo comparativo entre posto de pesagem veicular móvel e um sistema WIM implantado na rodovia BR-290/RS – Freeway. *Anais do XXXII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Gramado, v. 1, p.3550-3561.
- BOSSO, M. (2018) *Uso da tecnologia Weigh-in-motion para a caracterização do tráfego rodoviário e do excesso de carga em veículos comerciais*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP.
- DER-SP (2006) *IP-DE-P00/001 - Projeto de Pavimentação*. Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo. São Paulo, SP.
- DNIT (2006) *Manual de Estudo de Tráfego*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, RJ.
- DNIT (2012) *Quadro de Fabricantes de Veículos*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Diretoria de Infraestrutura Rodoviária. Coordenação geral de operações rodoviárias. Abril. Rio de Janeiro, RJ.
- LAPAV (2019) *Relatório Final de Pesquisa RDT – ECOPONTE/ANTT – Definição de uma Metodologia para avaliar os impactos do aumento da tolerância nas cargas por eixo nos custos de manutenção de pavimentos de rodovias concedidas*. Porto Alegre/RS. Março de 2019. 117p.
- MOTA, R. V., BOSSO, M., BESSA, I. S., VASCONCELOS, K., BERNUCCI, L. L. B. (2018) Efeito do tráfego no dimensionamento de pavimentos asfálticos utilizando dados de pedágio. *Anais do XXXII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Gramado, v. 1, p.1230-1241.
- OLIVEIRA, M. F. (2016) *Definição e análise dos fatores de equivalência de carga dos eixos comerciais*. Trabalho de conclusão de graduação. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS.
- SANTOS, A. B. V., BASTOS, J. B. S., BARBOSA, J. S. (2018) Influência de sobrecargas na análise e na previsão de desempenho quanto à deformação permanente em pavimentos asfálticos. *Anais do XXXII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Gramado, v. 1, p.1309-1320.
- SÃO PAULO (Cidade) (2004) *IP-02/2004 Classificação das Vias*. Secretaria da Infraestrutura Urbana. Prefeitura de São Paulo. São Paulo, SP.
- YOUSIF, S., BERTHELOT, C., KELLN, R., SOARES, R., HANSON, R., BERGAN, T. (2012) Evaluating the role of Weigh-in-Motion in mechanistic pavement analysis. *6th International Conference on Weigh-in-Motion*, ICWIM, Dallas, Estados Unidos.