

IAG257-07-2013
DANO EM RODOVIAS DEVIDO A CARGA DINÂMICA COM SISTEMAS
DAÑO EN AUTOPISTA DEBIDO LA CARGA DINÁMICA CON SISTEMAS
MS/WIM

Gustavo Garcia Otto
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)
Florianópolis, Brasil
otto@labtrans.ufsc.br

Leto Momm
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)
Florianópolis, Brasil
leto.momm@gmail.com

Amir Mattar Valente
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)
Florianópolis, Brasil
amir.labtrans@gmail.com

Resumo

O trabalho ocupa-se do estudo do dano causado ao pavimento pelas cargas rolantes e que são agravados pela prática do transporte de cargas e passageiros com excesso de carga, crescentes na medida em que a fiscalização dos veículos de carga diminui. O estudo propõe executar a avaliação contínua das solicitações em um determinado pavimento asfáltico. Análise partes do monitorando a força dinâmica aplicada pelos veículos em movimento e a resposta mecânica do pavimento em diversas condições de temperatura e frequência de solicitação. Sendo assim, procurou-se estudar as tensões e deformações encontradas nas camadas da estrutura rodoviária em diversas condições de temperatura e frequência de solicitação, para assim, comparar com o comportamento regido na curva de fadiga do material definida em laboratório. O trabalho é organizado em duas etapas, análise de campo e análise de laboratório. Em campo são analisados os resultados da instrumentação de um trecho de rodovia com acesso controlado, conhecido como pista experimental da Araranguá (SC), cujo fluxo de veículos pode ser analisado e os materiais empregados na construção são conhecidos. Na análise em laboratório são identificadas as características mecânicas do pavimento tais como o módulo complexo e o comportamento de fadiga. Os ensaios são executados com o equipamento de flexão alternada do laboratório de pavimentação da UFSC. O trabalho apresenta os resultados finais do estudo, apresenta a simulação do efeito da carga de uma frota imaginária, supondo cem por cento da frota de veículos carregados com mesma carga, e uma simulação com uso de um espectro de carga.

Resumen

El trabajo se ocupa del estudio de los daños a la cubierta de carga y pasarelas que se exacerban por la práctica de transporte de carga y de pasajeros sobrecargados, lo que aumenta en la medida

en que la inspección de los vehículos de carga disminuye. El estudio propone implementar el monitoreo continuo de las solicitudes en un pavimento de asfalto dado. Análisis de partes de control de la fuerza dinámica aplicada por el vehículo en movimiento y la respuesta mecánica piso bajo condiciones variables de temperatura y frecuencia de aplicación. Por lo tanto, hemos intentado estudiar las tensiones y las tensiones encontradas en las capas de carretera de la estructura en diferentes condiciones de temperatura y frecuencia de aplicación, por lo tanto para comparar el comportamiento de la curva de fatiga del material gobernado definido en el laboratorio. El trabajo se organiza en dos etapas, el análisis de campo y análisis de laboratorio. Campo se analizan los resultados de la instrumentación de un tramo de carretera con acceso controlado, conocido como la pista Araranguá experimental (SC), cuyo flujo de tráfico pueden ser analizados y se conocen los materiales utilizados en la construcción. En los análisis de laboratorio identifica las características mecánicas del pavimento como módulo complejo y el comportamiento de fatiga. Las pruebas se realizan con la alternancia de Técnica de laboratorio flexión allanando el UFSC. El artículo presenta los resultados finales del estudio, la simulación muestra el efecto de la carga de una flota imaginaria, asumiendo el cien por ciento de la flota de vehículos cargados con la misma carga, y una simulación utilizando un espectro de carga.

INTRODUÇÃO

Os sistemas de pesagem em movimento são conhecidos mundialmente pela sigla WIM (Weigh-in-Motion), denominado de Pesagem em Movimento, e para múltiplos sensores a sigla é MS/WIM (Multiple Sensors Weigh in Motion), que significa pesagem em movimento com múltiplos sensores. Estes sistemas permitem estimar o a força resultante em cada eixo pertencente aos veículos em movimento. Além disso, tem grande potencial para aumentar a eficiência e eficácia do controle do sobrepeso, que está a cargo das autoridades responsáveis pelas operações rodoviárias.

A pesagem em movimento de veículos em alta velocidade está sendo pesquisada por diversos organismos internacionais para se tornar uma ferramenta automatizada do controle do transporte de cargas (DNIT/UFSC, 2009). Os sistemas de pesagem em movimento permitem a pesagem dos veículos diretamente no fluxo da via, nas velocidades praticadas e sem obrigar a frenagem ou aceleração, o que reduz o custo para os usuários.

O projeto de pesquisa de Sistemas de Pesagem em Movimento e Análise da Deterioração de pavimentos se dedica a estudar a operação de sistemas de pesagem em movimento e as causas da deterioração dos pavimentos asfálticos em rodovias típicas brasileiras. É uma iniciativa entre o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes e a Universidade Federal de Santa Catarina. O conhecimento da mecânica do comportamento das estruturas rodoviária permite aprimorar o entendimento dos fenômenos físicos que ocorrem no momento da passagem de um veículo. Nas análises das misturas asfálticas como a deformação na fibra inferior da camada asfáltica decorrente da carga em rolamento, e também, como a pressão se distribui pelas camadas e como a temperatura afeta a rigidez da camada asfáltica.

Ao final do projeto um modelo matemático é construído com ajuda de um software de análise numérica, que permitirá a execução da análise por simulações das condições encontradas em campo. O excesso de carga é considerado uma das principais causas da deterioração dos

pavimentos. Os resultados aqui apresentados mostram os passos para a construção de um modelo de deterioração de um segmento rodoviário. São apresentados os resultados de caracterização do concreto asfáltico, leituras de deformação de campo e o modelo construído.

DADOS DE CAMPO

A pista de testes é um segmento adjacente ao posto de pesagem PPV06 localizado nas proximidades do km-418. A pista é construída em múltiplas camadas de granulares e uma superficial de concreto asfáltico. A seção transversal é composta por um subleito semi-infinito arenoso, uma camada de 20 cm de macadame seco, uma camada de 18 cm de brita graduada e uma capa de 17 cm de Concreto Betuminoso Usinado a Quente - CBUQ. A extensão total é de 700 metros com uma faixa de 3,60 metros, acostamento de 3 metros e faixa de segurança de 2,5 metros. A pista opera como entrada de veículos pesados para o posto de pesagem, de acordo com a Figura 1.

Figura 1: Localização da pista de testes e sistemas pavimento e pesagem em movimento



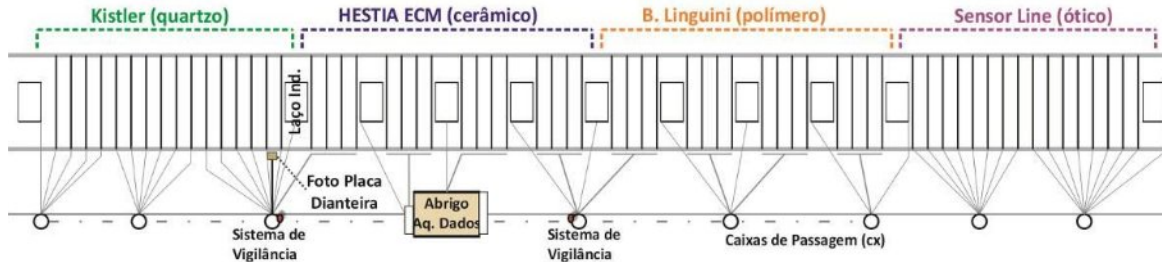
Dois sistemas instalados fazem parte da pesquisa de múltiplos sensores para pesagem em movimento e análise do comportamento do pavimento. Este relatório aborda as questões relevantes ao sistema de análise do comportamento mecânico da estrutura multicamadas do pavimento com o objetivo de estabelecer as relações entre as cargas transportadas e o dano causado ao pavimento.

O sistema de análise do comportamento do pavimento conta com dispositivos instalados sob e sobre o pavimento e que permitem a aquisição de informações para identificação e quantificação do comportamento quando solicitado, nas condições de temperatura e umidade. Um conjunto de sensores é instalado de forma a identificar a deformação da fibra inferior da camada asfáltica, camada de base e camada de sub-base; nos alinhamentos longitudinal e transversal; pressão no topo das camadas de base, sub-base e subleito; umidade nas camadas granulares e temperatura em três profundidades na camada de concreto asfáltico. Os esforços de deformação longitudinal na fibra inferior das camadas são monitorados por extensômetros (Strain Gauge) especialmente desenvolvidos para esta função.

Os dados de pesagem em campo vêm do sistema de pesagem em movimento instalados. O sistema é composto de quatro conjuntos de sensores de diferentes tecnologias, conforme a Figura

2. Os sensores de pesagem em movimento estão instalados em linhas transversais ao sentido de deslocamento do tráfego, as tecnologias empregadas são piezelétrico quartzo, piezelétrico cerâmico, piezelétrico polímero e sensores de fibra ótica.

Figura 2: Sistemas de Pesagem em Movimento (WIM) instalados na pista experimental



Os sistemas de pesagem fornecem informações da frota passante sobre a pista experimental. Os sensores são agrupados em grupos de dezesseis linhas com espaçamento de um metro entre cada linha. Os dados do sistema de pesagem são organizados por data e hora do momento em que o veículo é detectado pelo primeiro sensor. O evento contém a informação da classe do veículo, número de eixos, distância entre eixos, peso por eixo, peso bruto total e velocidade.

ANÁLISE DO DANO EM PAVIMENTOS

Análise da deterioração de pavimentos empregada utiliza ambas as medições do sistema de monitoramento de pavimentos e do sistema de pesagem em movimento juntamente com caracterização dos materiais em laboratório. Os sensores instalados na estrutura do pavimento informam o comportamento do pavimento no momento da passagem dos veículos. Na medida em que se desloca pela pista experimental, o mesmo veículo é então identificado e pesado pelos sistemas de pesagem.

Um modelo numérico é construído, com as características dos materiais avaliados em laboratório e campo. Os dados de laboratório são a determinação do módulo complexo e da curva de fadiga. Estes duas características regem o comportamento da estrutura ao longo da vida útil da estrutura do pavimento. A estrutura é avaliada com as informações do tráfego determinado pela coleta de dados do sistema de pesagem em movimento e pelos dados do volume de tráfego do posto de pesagem.

Características Mecânicas da Mistura Betuminosa

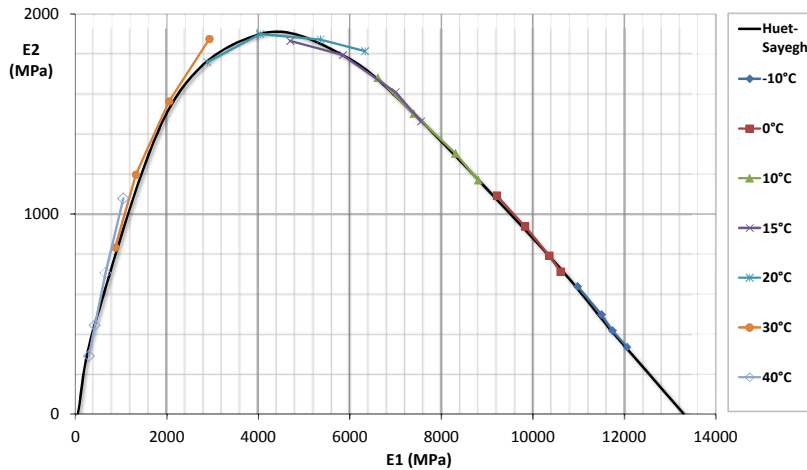
As características mecânicas do material são investigadas com o equipamento de flexão alternada em corpos de prova trapezoidais. Este equipamento permite determinar o módulo complexo e fadiga em diferentes condições de temperatura e frequência de carregamento. Os resultados do módulo complexo mostram característica viscoelástico linear do material asfáltico, isto porque as medidas estão no domínio das pequenas deformações. Todos os materiais viscoelásticos possuem uma resposta atrasado quando solicitados. No campo das pequenas deformações, uma pequena força sinusoidal resulta também em uma resposta sinusoidal (DE LA ROCHE, 1996). O módulo complexo $|E^*|$ pode ser expresso pela equação (1).

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad (1)$$

As diferentes componentes do modulo complexo variam de acordo com a temperatura e frequência. O resultado experimental $|E^*|$, ϕ , E_1 e E_2 são expressos pelas representações gráficas denominadas: isotérmica, isócrona, espaço Black e Cole-Cole. Para os ensaios no equipamento de flexão alternada, corpos de prova trapezoidais são processados de duas placas de dimensões 17x60x40 cm, removidas da camada asfáltica da estrutura. No ensaio de módulo complexo os corpos de prova são testados nas seguintes condições: temperaturas -10°, 0°, 10°, 15°, 20°, 30° e 40°C e frequências 1, 3, 10 e 30 Hz. Os ensaios de módulo complexo segundo norma de ensaio NF EN 12697-26.

A Figura 3 apresenta a representação do módulo complexo na representação Cole-Cole da mistura asfáltica retirada do pavimento da pista experimental e a curva do modelo de Huet-Sayegh. E_1 representa a parte real do módulo ou a parte correspondente ao comportamento elástico. E_2 é a parte imaginária que está associada à característica viscosa da mistura.

Figura 3: Representação Cole-Cole e o modelo de Huet-Sayegh



A representação com a curva Cole-Cole permite determinar dos parâmetros do modelo de Huet-Sayegh (Huet, 1963). Estes parâmetros permitem construir modelos numéricos que consideram a característica viscoelástica termosuscetível. A Tabela 1 apresenta os valores que completam a equação (2) do modelo de cálculo. Estes parâmetros são determinados com auxílio do software Viscoanalyse (IFSTTAR, 2009), gratuito e disponibilizado pelo Institut Francais des Sciences et Technologies des Transports, de l'Amenagement et des Reseaux – IFSTTAR.

$$E^*(i\omega\tau) = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}} \quad (2)$$

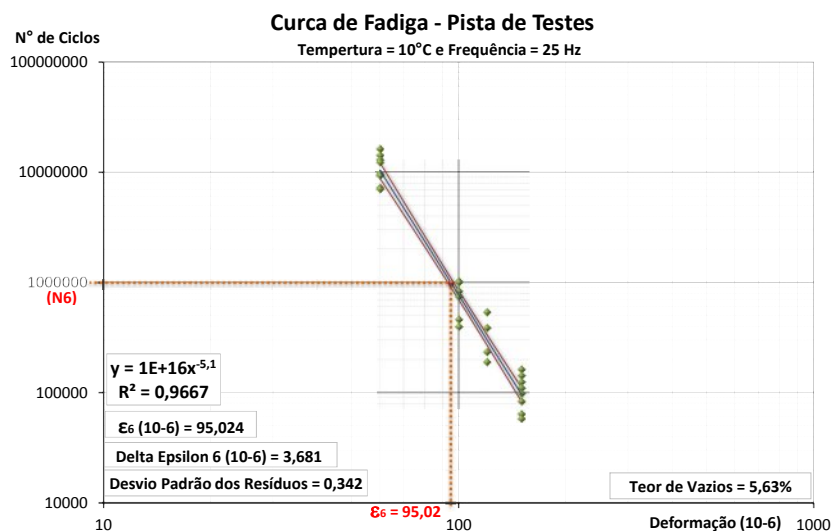
Tabela 1: Parâmetros de Hute-Sayegh

Eo	Einf	Delta	k	h	τ	C1	C2	T ref.	A0	A1	A2
1,254	13139	0,573	0,132	0,518	0,065	21,433	195,397	15	1,405	-0,295	0,0013

O teste de fadiga é executado em modo contínuo a deformação controlada, assim a rigidez do espécime diminui na medida em que o número de deformações aplicado aumenta. O nível de deformações de ensaio deve ser tal que ofereça resultados em torno de 10⁶ números de solicitações. O objetivo final do teste é encontrar qual da deformação correspondente à resistência do material quando aplicado um milhão de ciclos, esta é denominada de ϵ_6 . O teste é conduzido de acordo com a metodologia francesa, que procura recriar as piores condições para o material, então o teste foi executado a 10°C e 25Hz. A deformação ϵ_6 encontrada representa a deformação pela qual a estrutura do pavimento será dimensionada, a deformação admissível depois que aplicado os coeficientes de risco, definidos no manual de dimensionamento Francês.

A curva de fadiga é representada na Figura 4. A curva representa a susceptibilidade da mistura asfáltica ao esforço de deformação e é representada em escala log-log. A abcissa é a deformação, em 10⁻⁶ m, e a ordenada é o número acumulado de ciclos de deformação. A curva é uma reta representada por uma equação potencial onde a inclinação da reta é o expoente.

Figura 4: Curva de fadiga



A equação (3) representa a curva de fadiga encontrada:

$$N = 1.22 * 10^{16} * Def^{-5.10} \quad (3)$$

A deformação específica resultante do teste de fadiga é a deformação para 10⁶ ciclos. Quando o número de ciclos N é substituído na equação (3) fornece a deformação ϵ_6 igual a 95,024 μm . N representa o número de solicitações aplicados ao qual o pavimento receberá ao longo dos anos,

em outras palavras, representa a soma dos carregamentos pela qual irá passar sobre a seção do pavimento durante seu tempo de vida. Além disso, a equação permite a comparação das deformações de campo com as solicitações da curva de fadiga, estabelecendo uma relação de dano.

Modelo de Análise

O modelo de análise considera que existe um espectro de carregamento (carga, ou peso por eixo/grupo de eixos) para cada carga velocidade da carga e da temperatura do pavimento. Um programa computacional permite calcular o espectro de deformação em função da velocidade e temperatura. O espectro de frequência de deformação apresenta a distribuição de deformações que são aplicadas ao pavimento em função do tráfego passante e suas características (composição, carga e velocidade).

O dano é então calculado em função da carga (C), velocidade (V) e temperatura (T), conforme apresentado na equação (4). O dano é o somatório dos danos acumulados ao longo da vida do pavimento e rompe que quando valor de D for igual a um.

$$D = \sum_k^C \sum_i^V \sum_j^T \frac{n_{ijk}}{N_{ijk}} \times 100 \quad (4)$$

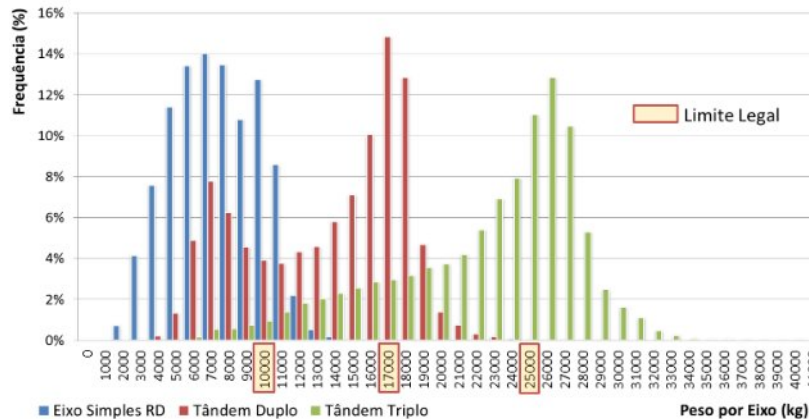
Na equação n é o número de solicitações encontrado para um determinado tempo de vida e N é o número de solicitações que causa a ruptura, em um determinado valor de deformação. A curva de fadiga permite relacionar o tempo de vida, nesta análise como em anos, pelo número de solicitações aplicado.

RESULTADOS

A frota de veículos representativos, 83% do volume total, é composta por cinco classes de veículos (principais): classe 3C com 26,34%, classe 3S3 com 15,48%, classe 2S3 com 15,23%, classe 2C com 14,48% e classe 2S2 com 11,24% do total de veículos. Na Figura 27 ilustra a frequência de todos os veículos da frota.

O estudo da distribuição de cargas por tipo de eixo permite determinar as conversões para o número de eixo equivalente e a determinação da deformação característica da frota. Quatro tipos de eixos se destacam de todos existentes: eixo simples roda simples (ESRS), eixo simples roda dupla (ESRD), eixo tandem duplo (ETD) e eixo tandem triplo (ETT). No contexto da frota os veículos possuem diferentes tipos de eixos e para cada tipo de eixo há uma respectiva distribuição de carga. As cargas de campo obedecem a uma distribuição normal com valores próximo ao limite legal, podendo ser abaixo e acima do valor esperado. A Figura 5 mostra a frequência de cargas para os tipos de eixos e seus limites legais.

Figura 5: Frequência das cargas por tipo de carga



Os parâmetros são carregados no software de análise da estrutura do pavimento. Entre os resultados apresentados, a deformação longitudinal do pavimento é o comportamento do pavimento observado. Tem relação direta com a deformação encontrada na curva de fadiga que estabelece o comportamento da vida útil do pavimento frente às solicitações. As informações de projeto para a simulação do tráfego sobre o comportamento esperado do pavimento são: ano da abertura do tráfego: 2011; período de projeto de 10 anos: 2021; características do concreto asfáltico (Modelo reológico de Huet-Sayegh); características da base de BG, sub-base de MS e do subleito; tipos de eixos: simples roda dupla, tandem duplo e tandem triplo; temperatura média real do pavimento ($z = 17\text{cm}$): 22°C ; velocidades: 80km/h e 60km/h .

Os parâmetros físicos e estatísticos para simulação da numérica do comportamento do pavimento é apresentado na Tabela 2. Os coeficiente k_r , k_c e k_s são os coeficientes que corrigem a deformação ϵ_6 do ensaio de fadiga e o transforma na deformação admissível de projeto (IFSTTAR, 2009).

Tabela 2: Parâmetros físicos e estatísticos para simulação numérica do pavimento

Parâmetro		Valor
Módulo Complexo (MPa)	$ E^* $ (10°C ; 10Hz)	8416
	$ E^* $ (10°C ; 25Hz)	8440
	$ E^* $ (15°C ; 10Hz)	7186
Fadiga	ϵ_6 (10^6)	95,024
	Inclinação da curva (b)	-5,1
Coeficientes	K_r	1,0
	K_c	1,1
	K_s	1,0

Simulação da Frota

Duas simulações são aplicadas e mostram a susceptibilidade do pavimento da vida do pavimento a variação da carga e a variação da velocidade. O resultado é organizado considerando uma frota composta de cem por cento de eixos simples (ERSD), de eixos tandem duplo (ETD) e de eixos

tandem triplo (ETT). As informações da análise, considerado o aumento da carga partindo da carga limite para o eixo, são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Ano de ruptura da estrutura analisada de acordo com a velocidade da frota.

EXOS	Carga	ϵt (obtido) (10^{-6}) 80km/h	ϵt (obtido) (10^{-6}) 60km/h	Ano de ruptura (esperado, 2021) 80km/h	Ano de ruptura (esperado, 2021) 60km/h
ESRD	8,2t	49,9	51,0	2026	2023
	10t	60,8	62,1	2013	2013
	10,5t	63,8	65,2	2011	2011
	10,75t	65,4	66,8	2011	2011
ETD	17t	49,7	50,9	2026	2023
	17,85t	52,2	53,5	2022	2020
	19,19t	56,1	57,5	2017	2016
ETT	25t	48,3	49,6	2026	2023
	26,25t	50,8	52,0	2023	2023
	28,22t	54,6	55,9	2019	2017

Em todos os eixos, o aumento da carga em um valor acima do limite de carregamento previsto, diminui a expectativa de vida útil do pavimento. A velocidade tem efeito importante na duração da vida útil, quanto menor for à velocidade maior é dano causado.

Os resultados da análise para cada tipo de eixo, variando a velocidade com que a carga é apresentada. É mantido o ano esperado para ruptura como sendo 2021. A Tabela 4 mostra com os valores do ano de ruptura previsto para uma frota composta de cem por cento de veículos com eixos simples roda dupla ESRD.

Tabela 4: Ano de ruptura para um eixo ESRD

Aumento de Carga	40km/h	60km/h	80km/h	100km/h	120km/h
0%	2013	2013	2013	2014	2014
5%	2012	2012	2013	2013	2013
7,5%	2012	2012	2012	2012	2013
10%	2011	2012	2012	2012	2012
12,5%	2011	2011	2012	2012	2012
15%	2011	2011	2011	2012	2012

A Tabela 5 mostra com os valores do ano de ruptura para uma frota composta de cem por cento de veículos com eixos tandem duplo ETD.

Tabela 5: Ano de ruptura para um eixo ETD

Aumento de Carga	40km/h	60km/h	80km/h	100km/h	120km/h
0%	2018	2019	2020	2020	2022

Aumento de Carga	40km/h	60km/h	80km/h	100km/h	120km/h
5%	2016	2017	2018	2018	2020
7,5%	2015	2016	2017	2017	2019
10%	2015	2016	2016	2017	2018
12,5%	2014	2015	2015	2016	2017
15%	2014	2014	2015	2015	2016

A Tabela 6 mostra com os valores do ano de ruptura para uma frota composta de cem por cento de veículos com eixos tandem triplo ETT.

Tabela 6: Ano de ruptura para um eixo ETT

Aumento de Carga	40km/h	60km/h	80km/h	100km/h	120km/h
0%	2019	2020	2021	2022	2022
5%	2017	2018	2019	2020	2020
7,5%	2016	2017	2018	2019	2019
10%	2015	2016	2017	2018	2018
12,5%	2015	2016	2016	2017	2017
15%	2014	2015	2016	2016	2016

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O projeto de estudo de sistemas de pesagem em movimento e análise da deterioração de pavimentos toma como bases em estudos realizados na Europa, América e Ásia, entre outros. O Brasil, assim como muitos países, também está pesquisando o potencial dos sistemas de pesagem em movimento para utilizar como ferramenta de análise, controle e fiscalização das cargas em movimento. Os sistemas permitem a coleta de toda a frota passante em um determinado trecho ininterruptamente e sem necessidade de muitos agentes de trânsito o que fornece numerosas possibilidades para o emprego.

As condições deste estudo são únicas, isto porque os parâmetros encontrados em campo como a frota veicular, o clima, a pista experimental, o conjunto de sensores utilizados e o tipo de estrutura do pavimento são únicos para as condições da pista experimental em Araranguá. O estudo das deformações da estrutura do pavimento combinados com a pesagem em movimento permite identificar os tipos de veículos, cargas transportadas e o danos correspondentes.

Os resultados apresentados neste trabalho mostram a suscetibilidade do pavimento a ação da carga e variação da velocidade na vida útil do pavimento. Apresenta que os diferentes tipos de eixos causam diferentes danos ao pavimento. Permite concluir que os diferentes tipos de veículos, com sua respectiva composição de eixos, causa um diferente tipo de dano ao pavimento. A variação da velocidade é outro fator importante do qual alguns modelos matemáticos empregados para a modelação de estruturas de pavimentos não avaliam.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte, DNIT, ao Coordenador Geral de Operações Rodoviárias, da CGPERT, por acreditar nas pesquisas como meio para o avanço do conhecimento e do emprego de novas tecnologias. À Universidade Federal de Santa Catarina que apoia as pesquisas realizadas. Ao Departamento de Engenharia Civil, ao Laboratório de Transportes e Logística, Labtrans, que coordena o projeto, e ao Laboratório de Pavimentação da UFSC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

De La Roche, C. Module de Rigidité et Comportement en Fatigue des Enrobés Bitumineux: Expérimentations et Nouvelles Perspectives d'Analyse. 185 f. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Ecole Centrale de Paris, Paris, 1996.

Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes / Universidade Federal De Santa Catarina. Sistema MSWIM. Coordenação Geral de Operações Rodoviárias. Laboratório de Transportes e Logística. Florianópolis, 2009.

Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes / Universidade Federal De Santa Catarina. Modelo Geral do Experimento. Coordenação Geral de Operações Rodoviárias. Laboratório de Transportes e Logística. Florianópolis, 2009

Huet, C. Étude par une méthode d'impédance du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbonés. Tese de Doutorado. Faculté des Sciences de l'Université de Paris, 1963.

IFSTTAR. Note d'utilisation de l'application logicielle visco-analyse. Road Materials and Pavements Design. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées – Université Paris, 2009.