



26° Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 49ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv)

Análise de modelos de previsão de consumo de combustível em veículos a partir da irregularidade longitudinal do pavimento

Eduarda Lemos Rodrigues¹; Leônidas Augusto da Silva¹; Andriele Ambros de Oliveira¹; Renan Gustavo Scherer¹; Deividi da Silva Pereira¹; Luciano Pivoto Specht¹ & Lucas Dotto Bueno¹

RESUMO

De acordo com a Confederação Nacional dos Transportes (CNT, 2023), o Brasil apresenta a maior parte das suas rodovias com defeitos no pavimento. Isto se reflete numa má qualidade funcional que implica, a partir de determinada magnitude, na necessidade de intervenções no pavimento. Esta qualidade funcional pode ser determinada pela irregularidade longitudinal do pavimento, que além de avaliar a qualidade do rolamento, também permite verificar seu impacto no conforto dos usuários e nos custos operacionais dos veículos, como o aumento do consumo de combustível. Em vista disto, a presente pesquisa foi realizada com o objetivo de identificar e comparar modelos que estimam ao longo dos anos o consumo de combustível utilizando como um dos parâmetros a irregularidade longitudinal do pavimento, e verificar aquele mais adequado para esta previsão. Para a realização da pesquisa foi realizada uma revisão bibliográfica de literatura técnico-científica, a fim de organizar um conjunto de modelos que estimam o consumo de combustível considerando a irregularidade longitudinal do pavimento. Após, os modelos encontrados foram simulados com diferentes valores de IRI a fim de compará-los entre si. Com base nas simulações realizadas foi possível perceber que evolução do consumo de combustível previsto nas diferentes condições de IRI avaliadas diferem entre os modelos. Dentre os avaliados, o modelo do software HDM-4 foi o que manteve maior consistência entre as diferentes simulações realizadas.

PALAVRAS-CHAVE: Pavimentos, Irregularidade Longitudinal, Consumo de Combustível, Revisão Bibliográfica, HDM-4.

ABSTRACT

According to the National Transportation Confederation (CNT, 2023), most of Brazil's roads have pavement defects. This is reflected in poor functional quality that implies, from a certain magnitude, the need for pavement interventions. This quality can be measured by the pavement roughness, which also assess ride quality, also makes it possible to check its impact on user comfort and vehicle operating costs, such as increased fuel consumption. In light of this, the present research aims to identify and compare models that estimate fuel consumption over the years using pavement roughness as one of the parameters, and to determine the most suitable model for this prediction. A literature review of technical-scientific literature was conducted to organize a set of models that estimate fuel consumption considering pavement roughness. Subsequently, the identified models were simulated with different International Roughness Index (IRI) values for comparison. Based on the simulations, it was observed that the predicted fuel consumption evolution under different IRI conditions varied among the models. Among those evaluated, the model from the HDM-4 software maintained the highest consistency across the different simulations.

KEY WORDS: Pavement, Roughness, Fuel Consumption, Bibliography Review, HDM-4.

¹ Universidade Federal de Santa Maria, duda.lr@hotmail.com; silva.leonidas@acad.ufsm.br; andriele.ambros@acad.ufsm.br; renangscherer@gmail.com; dsp@ufsm.br; luspecht@ufsm.br; lucas.bueno@ufsm.br.



INTRODUÇÃO

O transporte rodoviário é fundamental para o escoamento da produção e o deslocamento de pessoas no Brasil. Entretanto, mesmo sendo essencial para o funcionamento da economia do país, segundo relatório divulgado pela Confederação Nacional dos Transportes (CNT, 2023), 56,8% das rodovias apresentam defeitos no pavimento. A condição funcional presente na malha rodoviária é afetada por fatores como a qualidade construtiva, a seleção e dosagem dos materiais, a ação do tráfego e condições climáticas, resultando em desvios verticais da superfície do pavimento em relação à uma superfície plana. Tais desvios podem ser mensurados pelo Índice Internacional de Irregularidade (IRI, do inglês *International Roughness Index*), amplamente empregado em escala mundial para este tipo de avaliação (LEMLIN, 1998). Uma vez que a condição funcional da via afeta a trafegabilidade e conforto, faz-se necessário que haja intervenções ao longo da vida útil do pavimento, possibilitando assim um melhor fluxo de bens e usuários.

Bernucci *et al.* (2022) indicam que ao se transitar em vias deterioradas ocorrem prejuízos ao conforto dos usuários e um acréscimo nos custos operacionais, destacando-se o aumento do consumo de combustível. Desse modo, os autores complementam que um trecho que dispõe de boa qualidade melhora as condições dos passageiros, possibilita fluidez no tráfego e reduz os custos de transporte, qualidade esta que pode ser mensurada pelo IRI. Ademais, de acordo com Hellmann (2018), a condição de tráfego do veículo, sua potência de motor, aerodinâmica e calibração de pneus também são parte dos fatores que interferem no consumo de combustível.

Tanto a irregularidade longitudinal como o consumo de combustível podem ser estimados por meio de modelos. Diante disto, faz-se necessário a identificação e a análise destes modelos para assim comparar suas previsões. Desta forma, foi realizado o presente estudo, com o objetivo de identificar o conjunto de modelos que estimam o consumo de combustível ao longo do tempo, utilizando como um dos parâmetros a irregularidade longitudinal do pavimento, e analisar qual apresenta previsões mais adequadas para as condições nacionais atuais.

IRREGULARIDADE LONGITUDINAL

Segundo DNIT (2023), a forma empregada para avaliar a irregularidade longitudinal dos pavimentos é o Índice Internacional de Irregularidade (IRI), entendido como uma escala de medição que toma como base a resposta do modelo matemático que representa um semieixo de um automóvel ao perfil longitudinal da superfície da rodovia avaliada (SAYERS, 1995). Sua implementação, nos últimos anos, substituiu o uso do parâmetro Quociente de Irregularidade (QI) que era o responsável por avaliar a qualidade do rolamento e seu impacto na utilização dos usuários (DNER, 1994). Caso haja necessidade de conversão entre os dois parâmetros, pode-se seguir a indicação do Manual de Restauração (DNIT, 2006), que reproduz a conversão recomendada por Sayers; Gillespie e Queiroz (1986) e Paterson (1987), o modelo usual que correlaciona o QI com o IRI e é apresentado na Equação 1.

$$QI = 13 * IRI \quad (1)$$

Quanto a classificação da condição funcional das rodovias por meio do IRI, o DNIT (2017) indica cinco categorias, de excelente a péssimo. Ao analisar as condições de conforto do usuário, Bueno (2019) informa que valores de irregularidade menores que 2,7 m/km são os que apresentam melhores resultados. Outrossim o autor expõe que a trafegabilidade da via, considerando velocidades usuais de



circulação, correspondentes ao intervalo de 60 a 100 km/h, é afetada quando o IRI obtido ultrapassa os 3,5 m/km.

Desse modo, a previsão da irregularidade longitudinal possibilita o diagnóstico da ruptura funcional do pavimento e seus eventuais efeitos aos que trafegam na via (DOMINGUES, 2004). No decorrer do tempo, organizações público-privadas se ancoraram em modelos de previsão do IRI, desenvolvidos por variados pesquisadores e instituições, para gerenciar pavimentos e executar intervenções (BARELLA, 2008). Entre os modelos de estudo, percebe-se a utilização e combinação de variados parâmetros associados às condições locais encontradas para calibrar suas equações, dentre as quais se sobressaem a idade do pavimento, o tráfego e condição funcional da estrutura. Ainda, recebem grande destaque a aplicação do IRI inicial, tipo de clima, tipo de solo, dano médio acumulado e defeitos. A fim de possibilitar tal modelagem de maneira apropriada para as condições brasileiras e reduzir o empirismo com o uso de parâmetros mecanicistas em sua concepção, foi desenvolvido o trabalho de Bueno *et al.* (2022), que se destaca dentre os atuais modelos disponíveis e que em sua elaboração fez uso de dados coletados e analisados em pistas experimentais, buscando calibrar um modelo adequado às condições das vias brasileiras.

Modelo de Bueno *et al.* (2022)

O modelo de previsão da variação temporal do IRI de Bueno *et al.* (2022) é, dentre os demais, o que melhor e de forma mais atual agrega as condições nacionais. Sua elaboração partiu da avaliação e processamento de dados coletados em pistas do Rio de Janeiro e Rio Grande do Sul. Assim, ocorreu o desenvolvimento de uma equação empírica que, através da utilização do IRI inicial (IRI_i), número de solicitações do eixo padrão (N), deflexão ($D_{MÁX}$) e porcentagem de área trincada (AT), é capaz de prever a irregularidade longitudinal após determinado período, conforme a Equação (2):

$$IRI_{(t)} = IRI_i + \left[(3,54 \cdot 10^{-8} \times N) + (1,42 \cdot 10^{-4} \times (D_{MÁX} \times AT)) \right] \quad (R^2 = 0,77) \quad (2)$$

Ademais, também houve a calibração de um modelo empírico-mecanístico, que além da aplicação da idade do pavimento (AGE), associa o dano médio acumulado limitado à fadiga ($DANO_{LVECD}$) à irregularidade longitudinal encontrada, expresso pela Equação (3):

$$IRI_{(t)} = IRI_i + (0,0124 \times DANO_{LVECD} \times AGE) \quad (R^2 = 0,79) \quad (3)$$

RELAÇÃO ENTRE IRI E CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

Conforme já descrito, a irregularidade longitudinal do pavimento tem grande influência nos custos operacionais dos veículos, principalmente em despesas como o consumo de combustível. Islam e Buttlar (2012) desenvolveram um estudo em que é possível perceber a influência das condições da rodovia no aumento do custo operacional. Os autores utilizaram o MEPDG (*Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*), da AASHTO (2008), para estimar os custos operacionais dos usuários de rodovias com diferentes tipos de veículos e condições de irregularidade. Os resultados obtidos pelos autores indicaram que os custos referentes à evolução da irregularidade, contabilizando consumo de combustível, desgaste dos pneus, depreciação do veículo e manutenção da via variam em uma taxa de 0,00003 a 0,0003 US\$/veículo/milha/IRI, em valores da época.

Dentre os custos mencionados, um dos mais impactantes e que mais elevam o custo operacional é o decorrente do consumo de combustível. Velmurugan *et al.* (2009) destacaram que as características



das rodovias, como a irregularidade longitudinal, defeitos no revestimento, projeto geométrico, entre outros, são os principais fatores que interferem no consumo de combustível. A relação entre a condição das rodovias com o consumo de combustível é descrita por Jiao e Bienvenu (2016). Os autores afirmam que a irregularidade da superfície aumenta o trabalho mecânico dissipado dentro do sistema de suspensão do veículo e, conseqüentemente, gera um consumo excessivo de energia, ou seja, um aumento no consumo de combustível. Ademais, é importante ressaltar que o consumo está diretamente relacionado à emissão de Gases do Efeito Estufa (GEEs). De acordo com a CNT (2023), o setor de transporte é responsável por 35% do consumo energético do Brasil, e dentro desse percentual, 93,9% é oriundo do transporte rodoviário. Essa energia provém de combustíveis, em sua maioria, não renováveis e emitem gases e partículas através da combustão, que contribuem para o aumento do efeito estufa. Dessa forma, é evidente a extrema relevância do assunto em termos ambientais, principalmente na redução da emissão de GEEs por meio da melhora dos pavimentos.

METODOLOGIA

Para a pesquisa, foi realizada uma revisão bibliográfica de literatura técnico-científica, por meio de periódicos, artigos, teses e dissertações, a fim de organizar um conjunto de modelos que estimam o consumo de combustível ao longo dos anos utilizando como um dos parâmetros a irregularidade longitudinal do pavimento.

Após a compilação deste conjunto de modelos de consumo, foi simulada a sua aplicação em veículos do tipo automóvel, caminhão a diesel e semirreboque, para valores de IRI de 1,8; 2,7; 3,5; 5; 6; e 8 m/km em planilha eletrônica, buscando identificar o comportamento de cada um frente à irregularidade longitudinal do pavimento. O modelo HDM-4 (2006) foi simulado no próprio software devido ao fato de ter um desdobramento mais complexo. Foi utilizado um banco de dados único de valores para as variáveis envolvidas, como apresenta a Tabela 1, e os coeficientes de regressão originais dos diferentes modelos.

Tabela 1. Parâmetros empregados para simulações dos modelos (AUTORES, 2024)

Parâmetros	Tipos de Veículos		
	Automóvel	Caminhão	Semirreboque
Rampas	15 m/km	15 m/km	15 m/km
Rampas/km	2	2	2
Curvatura horizontal média	75°/km	75°/km	75°/km
Superelevação	3%	3%	3%
Limite de velocidade	80 km/h	80 km/h	80 km/h
Zona Climática	Tropical	Tropical	Tropical
Espessura do revestimento	75 mm	75 mm	75 mm
Número estrutural	2,45	2,45	2,45
CBR do subleito	8%	8%	8%
Grau de compactação da mistura asfáltica	97%	97%	97%
IRI inicial	1,0 m/km	1,0 m/km	1,0 m/km
Profundidade da Macrotextura	7 mm	7 mm	7 mm
Tempo de análise	10 anos	10 anos	10 anos
Crescimento do tráfego	0%	0%	0%
Marcha	5	5	5
Aceleração da gravidade	9,81 m/s ²	9,81 m/s ²	9,81 m/s ²



Altitude da rodovia	0,0 m	0,0 m	0,0 m
Pressão atmosférica	1013,5 mbar	1013,5 mbar	1013,5 mbar
Massa específica do ar	1,2 kg/m ³	1,2 kg/m ³	1,2 kg/m ³
Temperatura Ambiente	22 °C	22 °C	22 °C
Velocidade do ar	14,4 km/h	14,4 km/h	14,4 km/h
Área frontal do veículo	1,9 m ²	5,0 m ²	9,0 m ²
Coeficiente aerodinâmico	0,462	0,678	0,976
Diâmetro dos pneus	0,6 m	1,5 m	1,5 m
Número de pneus	4	6	18
Eficiência de transmissão	90%	86%	86%
Fator de conversão combustível para potência	0,067 mL/kW/s	0,057 mL/kW/s	0,055mL/kW/s
Consumo em marcha lenta	0,36 mL/s	0,37 mL/s	1,12 mL/s
Potência nominal máxima do motor	70 kW	100 kW	300 kW
Velocidade do motor em marcha lenta	800 rpm	500 rpm	500 rpm

MODELOS DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

Ao longo dos anos, variados autores desenvolveram modelos de previsão de consumo de combustível pelos veículos, em que levam em consideração, principalmente, características da via, do veículo e ambientais.

A partir de uma revisão bibliográfica na literatura técnico-científica, foram encontrados e elencados modelos de previsão de consumo de combustível desenvolvidos a partir da década de 80, concebidos em cenário nacional e internacional. Dentre os modelos disponíveis, destacam-se o modelo do GEIPOT (1982); o modelo Sul-Africano (1984); o do HDM-III (1987); o de *Du Plessis; Visser e Curtayne* (1990); o do *National Research Council of Canada – NRC* (2006); o do HDM-4 (2006); o de *Svenson e Fjeld* (2012); o do VTI (2012); o de *Okte; Al-Qadi e Ozer* (2019); e o MapEUR (2021). A seguir são apresentados e descritos, em ordem cronológica, tais modelos referenciados, assim como os principais parâmetros considerados em cada um para realizar a previsão de consumo. O detalhamento destes modelos está disponível nos seus respectivos trabalhos originais.

Modelo do GEIPOT (1982)

O Grupo Executivo para a Integração da Política de Transportes (GEIPOT) participou da pesquisa internacional “*Research on the Interrelationships Between Costs of Highway Construction, Maintenance and Utilization*” desenvolvida no Brasil na metade da década de 70, onde foram realizadas inúmeras avaliações para quantificar as características das rodovias, os custos de intervenção e os custos operacionais dos veículos. Entre os objetivos atingidos, está a elaboração de modelos empíricos para estimar o consumo de combustível dos veículos, havendo sido gerados sete modelos, um para cada classe de veículos consideradas no estudo: automóveis, ônibus, utilitários, caminhões leves (gasolina), caminhões leves (diesel), caminhões pesados e semirreboque. Estes modelos utilizam como parâmetros o greide da via (GR), o QI, o peso do veículo (P), a marcha do veículo (MARC), e a velocidade (S). Destaca-se para o presente trabalho a equação 5, que representa o consumo de combustível de automóveis, a equação 6, para caminhões a diesel e a equação 7, para semirreboques.

$$C = 0,142e^{0,022875S+0,000855(S)GR+0,03782(GR+3)P+0,2695(5-MARC)+0,0001024(QI)(GR+14)} \quad (5)$$



$$C = 0,1826e^{0,0325S+0,00208(GR)S+0,0254(GR+1)P+0,2333(S-MARC)+0,0014005(QI)} \quad (6)$$

$$C = \left(\frac{2,54}{\sqrt{1+G}} \right) e^{[0,00505+0,00029(GR+1)P+0,00035(QI)]S} \quad (7)$$

Modelo Sul-africano (1984)

Em *Bester* (1984) é apresentado um modelo sul-africano que possibilita a previsão do consumo de combustível em velocidade constante, dependente de calibração experimental. O seu conceito principal leva em consideração o deslocamento do veículo, para o qual há a necessidade de uma energia superior àquela gerada por três forças que se opõem ao movimento: a resistência ao rolamento (R_r); a resistência do ar (R_a); e a resistência devido ao greide da rodovia (R_g). Essas resistências são calculadas através de variáveis como o greide da rodovia (G), o QI e outros parâmetros do veículo que influenciam na energia despendida com perdas na transmissão e com a fricção interna. Desta forma, o modelo, apresentado na equação 8, utilizou como parâmetros: velocidade, greide da rodovia, e funções (p_1 , p_2 , p_3 e p_4) que dependem do fator de conversão de combustível, da massa do veículo, da eficiência da transmissão, da projeção da área frontal do veículo, do coeficiente de arrasto dinâmico, da massa específica do ar, da gravidade e de coeficientes de resistência ao rolamento.

$$F = p_1 + \frac{p_2}{V} + p_3V^2 + p_4G \quad (8)$$

Modelo do HDM-3 (1987)

Descrito por *Watanada et al.* (1987), este modelo de previsão do consumo de combustível possui caráter mecânico e utiliza dados experimentais obtidos no Brasil entre as décadas de 70 e 80, admitindo o cálculo do consumo em L/1000 veículos-km a partir do consumo instantâneo em subida (UFC_u) e em descida (UFC_d), expressos em mL/s, da velocidade em subida (V_u) e em descida (V_d) e coeficientes de calibração. Esse consumo instantâneo, apresentado na equação 9, necessita de parâmetros que envolvem o pavimento, como o somatório de subidas e descidas, e o coeficiente de rolamento do pavimento, que engloba o QI e constantes calibradas para o modelo.

$$FL = 500\alpha_1\alpha_2 \left(\frac{UFC_u}{V_u} + \frac{UFC_d}{V_d} \right) \quad (9)$$

Modelo de *Du Plessis, Visser e Curtayne* (1990)

O modelo publicado por *Du Plessis; Visser e Curtayne* (1990) possui o mesmo conceito do modelo sul-africano disponível em *Bester* (1984), como é apresentado na equação 10. A diferença entre os modelos é que o modelo de 1990 considera a macrotextura do pavimento e a temperatura dos pneus nos coeficientes de resistência ao rolamento.

$$F = p_1 + \frac{p_2}{V} + p_3V^2 + p_4G \quad (10)$$



Modelo do NRC (2006)

O modelo produzido para a *National Research Council of Canada* (NRC), elaborado por *Taylor e Patten* (2006) destaca-se por possuir constantes definidas para automóveis e caminhões de acordo com as estações do ano (C_1 até C_9) e considerar o IRI na sua equação. Outros parâmetros como o greide da rodovia (*Grade*), a temperatura da via ou ambiente ($P_{av_{temp}}$), tipo de revestimento (P_{vash} quando o revestimento for asfáltico, e P_{vash} quando o revestimento for composto por concreto e asfalto), massa total do veículo (*Load* - somente para caminhões), velocidade (*Speed*) e o quadrado da velocidade absoluta do ar (*AirSpdSq*), também são empregados na estimativa do consumo de combustível do modelo apresentada na equação 11.

$$FuelCon = C_1 + C_2 \cdot P_{vash} + C_3 \cdot P_{vcomp} + C_4 \cdot IRI + C_5 \cdot Grade + C_6 \cdot Load + C_7 \cdot Pav_{temp} + C_8 \cdot Speed + C_9 \cdot AirSpdSq \quad (11)$$

Modelo do software HDM-4 (2006)

Entre os modelos de previsão de consumo de combustível pesquisados, compete evidenciar o modelo do software HDM-4, descrito por *Odoki e Kerali* (2006). Além de possuir caráter mecanístico, ele envolve diversos parâmetros, como a altitude da rodovia, características de tráfego, greide, geometria do pavimento, IRI, profundidade da macrotextura e parâmetros em relação ao veículo, além de permitir calibrações de condicionantes locais e temporais, relacionados às vias e aos veículos. A aplicação do modelo possuiu diversas etapas, onde são realizadas estimativas separadamente cada período de tráfego e para subidas e descidas, relacionando com o nível de serviço da via ao longo do ano. A irregularidade, representada pelo IRI, está presente no coeficiente de resistência ao rolamento do pavimento, um dos parâmetros para o cálculo da resistência total ao rolamento, que influencia na potência total requerida para o movimento constante do veículo ($PTOT_{kpu}$), uma das variáveis da equação principal de previsão do consumo instantâneo de combustível estimado pelo software. A taxa de consumo em marcha lenta ($IDLE_{FUEL}$), o fator de eficiência consumo-energia do veículo ($ZETA_{kpu}$), e o fator de consumo adicional devido as alterações de velocidade do veículo ($dFUEL_{kpu}$), são os outros parâmetros da equação principal do consumo, apresentada na equação 12.

$$IFC_{kpu} = Max[IDLE_{FUEL_k}; ZETA_{kpu} \cdot PTOT_{kpu} \cdot (1 + dFUEL_{kpu})] \quad (12)$$

Modelo de Svenson e Fjeld (2012)

O modelo desenvolvido por *Svenson e Fjeld* (2012) foi elaborado para condições da Suécia e exclusivamente para caminhões semirreboques. Tendo caráter empírico, o modelo teve como conceito correlacionar características da via com a velocidade, em diferentes segmentos ao longo de uma rota de transportes usual para o tipo de veículo considerado no país. Após diversas regressões múltiplas, os autores estabeleceram o modelo apresentado na equação 13, que tem como parâmetros o greide da via (G) e o IRI.

$$F = 46,19 + 22,33 \cdot G + 1,47 \cdot G^2 + 7,70 \cdot IRI \quad (13)$$

Modelo do VTI (2012)

Desenvolvido para o *Statens väg- och transportforskningsinstitut* (Instituto Nacional Sueco de Pesquisa Rodoviária – VTI), este modelo sueco pertence ao projeto internacional MIRIAM (*Models for Rolling Resistance In Road Infrastructure Asset Management Systems*) e utiliza características de



veículos e rodovias usuais nas vias administradas pela agência nacional sueca. Apresentando caráter mecanístico-empírico, o modelo consiste em um conjunto de equações para diferentes veículos, cujas variáveis contemplam a velocidade do veículo, a irregularidade longitudinal do pavimento (IRI, em m/km), a profundidade da macrotextura do revestimento, o grau de curvatura médio da rodovia (rad/km), e o greide da rodovia. O modelo geral, que é apresentado na equação 14, parte de coeficientes do próprio modelo (c_0 até c_4), da velocidade de rotação do eixo de entrada na caixa de engrenagens (NRs), e da função Mind, que depende de parâmetros como a potência do motor e a fricção interna do motor.

$$Fct = c_0 \cdot (Mind + c_1 \cdot Mind^2 + c_2 \cdot Mind^3) \cdot (NRs + c_3 \cdot NRs^2 + c_4 \cdot NRs^3) \quad (14)$$

Modelo de Okte; Al-Qadi e Ozer (2019)

O estudo produzido por Okte; Al-Qadi e Ozer (2019) buscou identificar os efeitos da condição do pavimento em seu custo do ciclo de vida, elaborando um modelo de previsão do consumo de combustível. Os autores utilizaram o MOVES (*motor vehicle emission simulator*) para estimar a energia a ser fornecida pelo motor para diferentes condições de irregularidade longitudinal do pavimento, determinada pelo IRI. Para esse processo, foi variada a velocidade simulada e o nível de emissão de poluentes, assim associando cada situação a um valor correspondente de IRI. Além disso, para cada nível de emissão simulado, foi calculada a energia correspondente a ser obtida do combustível e gerado um banco de dados. Com isto, foi realizada uma correlação da energia necessária com a velocidade e a irregularidade longitudinal do pavimento. O modelo é apresentado na equação 12 e tem como variáveis: coeficientes de regressão (k_a , d_a , k_c , d_c , p e b), velocidade do veículo (v) e irregularidade longitudinal (IRI).

$$RSI_{t=0}^{Energy}: \hat{E}(v, IRI) = \frac{p}{v} + k_a \cdot IRI + d_a + b \cdot v + (k_c \cdot IRI + d_c) \cdot v^2 \quad (15)$$

Modelo do MapEUR (2021)

O *software* MapEUR (*Map of Energy Use on Road*), apresentado por Samson et al. (2021), estima o consumo energético de caminhões ao longo de uma rota e expõe os resultados na forma de mapas. Para tal, realiza a determinação da força de tração necessária para o veículo percorrer um segmento rodoviário a uma determinada velocidade (v), a partir de parâmetros como: greide da rodovia (Δ), massa do veículo (m), força de tração (F_t), gravidade (g), densidade do ar (ρ), área frontal do veículo (A_{c_d}), velocidade do vento (v_w) e o coeficiente de resistência ao rolamento (c_r), que depende de três fenômenos: a deformação viscoelástica do pneu, a irregularidade longitudinal (IRI) e a deformação viscoelástica da estrutura. Assim, o modelo geral, representado na equação 16, foi desenvolvido para estimar a força necessária ao movimento, a partir da qual pode-se determinar a energia necessária e o consumo de combustível.

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = F_t - m \cdot g \cdot (\Delta + c_r) - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_{c_d} (v - v_w)^2 \quad (16)$$

SIMULAÇÕES DOS MODELOS DE PREVISÃO DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

A fim de comparar a previsão de consumo de combustível obtida pelos diferentes modelos



apresentados, estes foram simulados para três tipos de veículos, variando os valores de IRI para 1,8; 2,7; 3,5; 5; 6 e 8 m/km. Na sequência, com os resultados obtidos, foram plotados gráficos dos diferentes modelos, para cada tipo de veículo. A análise foi realizada para automóveis, exposta na Figura 1, para caminhão diesel, presente na Figura 2 e para semirreboque, conforme Figura 3.

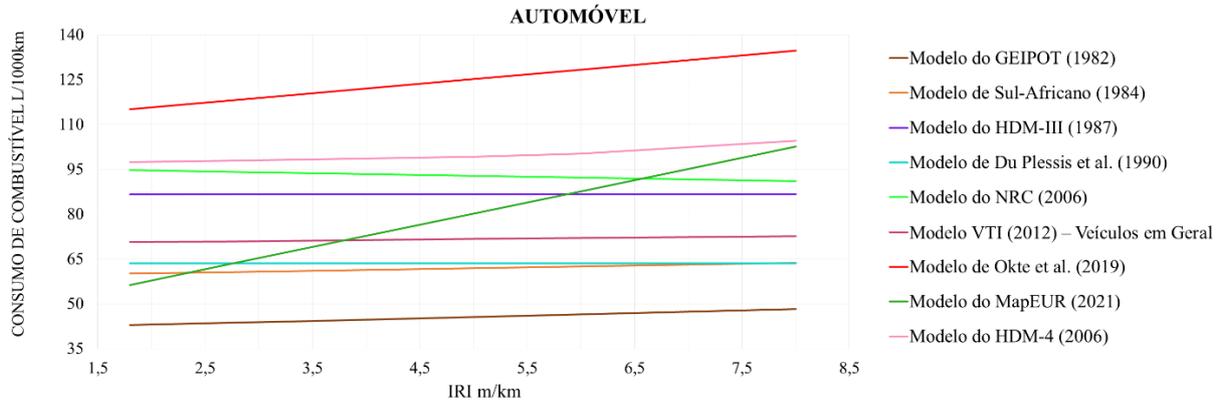


Figura 1. Gráfico de simulação de estimativa de consumo de combustível para automóveis (AUTORES, 2024)

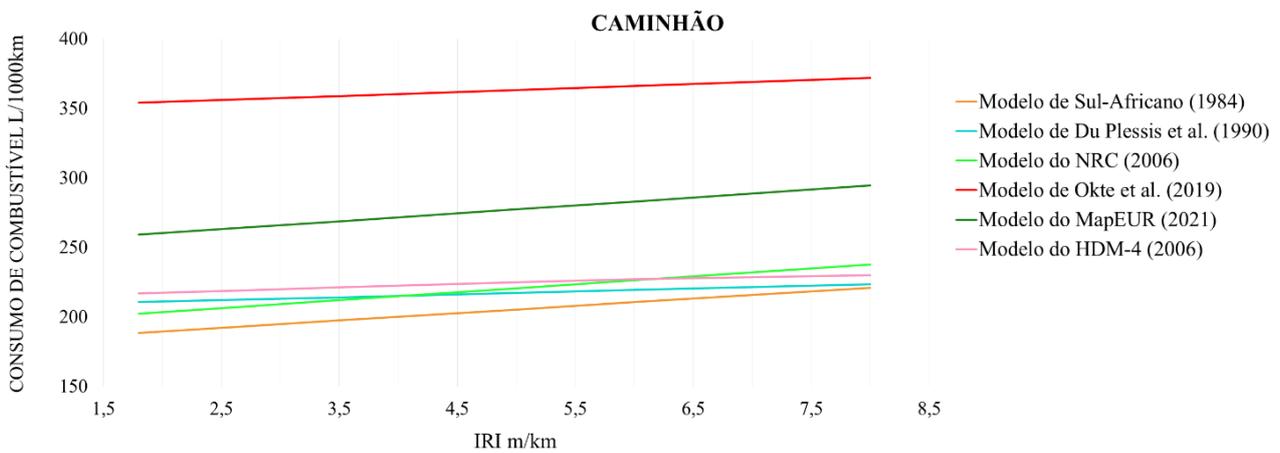


Figura 2. Gráfico de simulação de estimativa de consumo de combustível para caminhões (AUTORES, 2024)

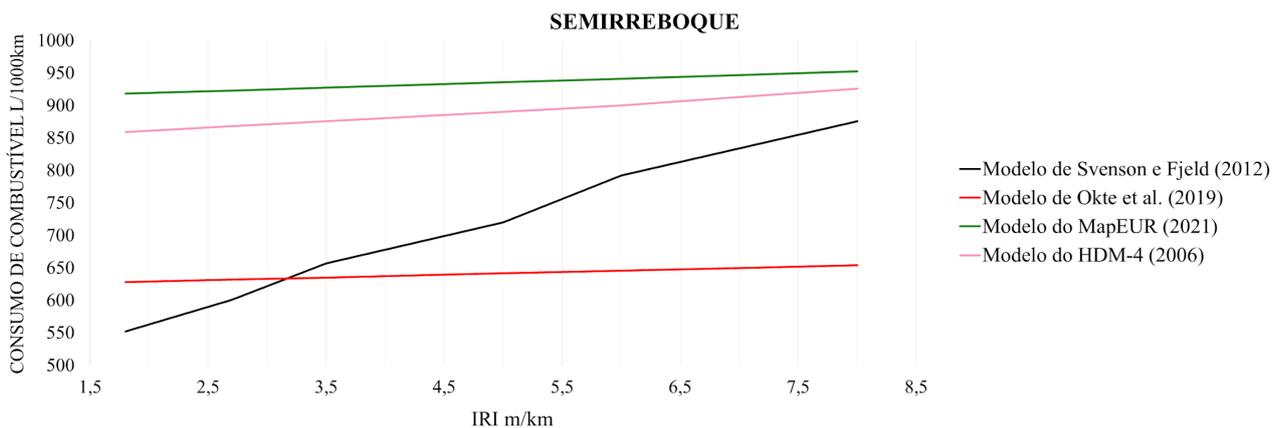


Figura 3. Gráfico de simulação de estimativa de consumo de combustível para semirreboques (AUTORES, 2024)



A partir das simulações realizadas, foi possível avaliar a interação dos modelos com a evolução do IRI. Conforme demonstrado nas Figuras 1, 2 e 3, os resultados dos modelos do GEIPOT (1982) e Sul-africano (1984), de caráter empírico, indicam que tais modelos tendem a se tornar ultrapassados por não conseguirem contemplar a evolução tecnológica. Isto é mais evidente nas Figuras 1 e 2, que demonstram que estes modelos possuem valores baixos em comparação aos demais, alcançando respectivamente, 48,24 L/ 1000 Km e 63,77 L/ 1000 Km.

O modelo de *Du Plessis; Visser e Curtayne* (1990), que possui o mesmo conceito que o modelo Sul-africano (1984), comprova que mesmo acrescentando outros parâmetros, ainda possuem semelhanças entre si, sendo possível observar uma pequena diferença apenas na Figura 2.

O modelo do NRC (2006) para automóveis realça-se por possuir uma tendência diferente dos demais, como pode ser observado na Figura 1, que expõe uma redução de 3,89% do consumo com o aumento do valor do IRI. Por sua vez, o modelo para caminhões dos mesmos autores, como indicado na Figura 2, apresenta o aumento 17,58% do consumo de combustível com o crescimento do IRI. Assim, o modelo demonstra inconstância por não manter um padrão em sua representação do consumo.

Os modelos de *Du Plessis; Visser e Curtayne* (1990), do HDM-3 (1987) e do VTI (2012), foram modelos que demonstraram dificuldade em captar a influência IRI, visto que, a porcentagem do aumento do consumo foi inferior a 3% para o modelo do VTI, já para os modelos de *Du Plessis; Visser e Curtayne* (1990) e do HDM-3 (1987) o consumo teve um percentual menor que 0,5%.

Os modelos mais atuais, de *Okte; Al-Qadi e Ozer* (2019) e MapEUR (2021), são os modelos mais convenientes na relação da influência do consumo no IRI, por possuírem os acréscimos mais relevantes na evolução da irregularidade. Sendo que para os automóveis e considerando valores de IRI de 1,8 m/Km até 8 m/Km, o modelo de *Okte; Al-Qadi e Ozer* (2019) gerou um aumento no consumo de combustível de 17,07% e o modelo do MapEUR (2021) um aumento de 82,03%.

O modelo de *Svenson e Fjeld* (2012) desenvolvido especialmente para caminhões semirreboque, demonstrou que a irregularidade impacta demasiadamente no resultado do consumo, tendo como aumento 58,65% de consumo, como é observado na Figura 3.

Dos modelos avaliados, o que conseguiu manter regularidade na sua representação foi o HDM-4 (2006), que demonstrou progressão gradual na evolução do IRI, como observado nas Figuras 1, 2 e 3, tendo respectivamente como aumento de consumo 7,39%, 6,01% e 7,74% na comparação entre os valores de IRI de 1,8 e 8 m/km.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O consumo de combustível é um importante componente dos custos operacionais dos veículos e uma fonte de emissão de GEEs. Conforme demonstrado no presente trabalho, ele guarda relação com, dentre outros fatores, a condição funcional do pavimento. Prever a variação dessa condição, representada especialmente pela irregularidade longitudinal do pavimento, e como isso se reflete na quantidade de combustível utilizada pelos veículos é relevante para um melhor gerenciamento dos pavimentos e a busca pela minimização deste consumo. Para tal, diferentes modelos de previsão foram identificados na literatura e comparados entre si. Desta avaliação, foi possível constatar que as previsões geradas divergem entre si, o que em parte se deve ao caráter empírico de alguns modelos. Além disso, as calibrações empregadas, mesmo em modelos mais avançados, podem estar defasadas para as condições locais e atuais de pavimentos e da frota de veículos. Isso indica uma necessidade da atualização de tais modelos ou elaboração de novos. Dentre os atualmente disponíveis, destaca-se o modelo do HDM-4, que apresentou observações mais consistentes na previsão de consumo e que,



além disso, possui um caráter mais mecânico, fazendo com que se apresente como uma melhor alternativa para estudos da influência da condição funcional do pavimento no consumo de combustível que os demais.

AGRADECIMENTOS

À ANP/PETROBRAS, CNPq e FAPERGS pelas bolsas dos autores e pelo apoio às pesquisas do GEPPASV/UFSM.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN ASSOCIATION OF HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). *Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG). Washington (EUA), 2008.
- BARELLA, R. M. Contribuição Para a Avaliação da Irregularidade Longitudinal de Pavimentos com Perfilômetros Inerciais. 362 p. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2008.
- BERNUCCI, L. B.; Motta, L. M. G.; Ceratti, J. A. P.; Soares, J. B. Basic Training for Engineers. Abeda, Rio de Janeiro, 2022.
- BESTER, C. J. *Effect of Pavement Type and Condition on the Fuel Consumption of Vehicles. Transportation Research Record 1000*, pg 28-38, 1984.
- BUENO, L. D. Contribuição para a previsão empírico-mecanicista da irregularidade longitudinal e seus desdobramentos econômicos em pavimentos asfálticos. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria. 2019.
- BUENO, L. D.; PEREIRA, D. S.; SPECHT, P. P.; NASCIMENTO, L. A. H.; SCHUSTER, S. L.; FRITZEN, M. A.; KIM, Y. R.; BACK, A. H. *Contribution to The Mechanistic-Empirical Roughness Prediction in Asphalt Pavements, Road Materials and Pavement Design*, 2022, DOI: 10.1080/14680629.2022.2029758.
- CNT. CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES. Pesquisa CNT de Rodovias. ed. 2023. Brasília, DF.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM (DNER). PRO 182/94. Medição da Irregularidade de superfície de pavimento com sistemas integradores IPR/USP e Maysmeter. Rio de Janeiro/RJ, 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES (DNIT). Manual de Restauração. Publicação IPR 720. Rio de Janeiro/RJ, 2006.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES (DNIT). Manual de Custos de Infraestrutura de Transportes – Volume 1. Brasília, DF, 2017.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES (DNIT). Levantamento do perfil longitudinal de pavimentos com perfilômetro inercial. DNIT 442/2023 - PRO. Ministério dos Transportes, Brasília. 2023.
- DOMINGUES, F. A. A. Notas de aula da disciplina: Irregularidade Longitudinal dos Pavimentos - PTR-5008. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Curso de pós-graduação em engenharia de transportes. São Paulo, 2004.
- DU PLESSIS, H. W., VISSER, A. T., CURTAYNE, P. C. *Fuel Consumption of Vehicles as Affected by Road-Surface Characteristics. Surface Characteristics of Roadways: International Research and Technologies, ASTM STP 1031*, W. E. Meyer and J. Reichert, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990, pp. 480-496.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PLANEJAMENTO DE TRANSPORTES - GEIPOT. *Research on the Interrelationships Between Costs of Highway Construction Maintenance and Utilization; final report - 1981*. Brasília, 1982. 12v. il.



- HELLMANN, A. Análise do consumo de combustível de um automóvel de passeio em trajeto com faixas elevadas para travessia de pedestres e trajeto livre. Projeto de Graduação. Curso de Graduação em Engenharia de Energia. Universidade Federal da Grande Dourados. Dourados, 2018.
- ISLAM, S; BUTLAR, W. G. *Effect of Pavement Roughness on User Costs. Transportation Research Record*, Nº 2285, Washington, D.C., p. 47–55. Washington (EUA), 2012. DOI: 10.3141/2285-06.
- JIAO, X; BIENVENU, M. *Pavement-Vehicle Interaction (PVI) and Comparative Highway Fuel Consumption: An Extended Field Investigation. 95th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington (EUA)*, 2016.
- LEMLIN, M. *Development of Tools for Performance Measurement. Final Report, PIARC Committee on Performance of Road Administrations (C15), World Road Association*, 1998.
- ODOKI, J. B.; KERALI, H. G. R. Analytical Framework and Model Descriptions. The Highway Development and Management Series, versão 2.0, v.4. *The World Road Association (PIARC), Paris and The World Bank, Washington D.C.*, 2006, 1184p.
- OKTE, E.; AL-QADI, I. L.; OZER, H. *Effects of pavement condition on LCCA user costs. Transportation Research Record*, p. 339-350, 2019.
- PATERSON, W. D. O. *Road Deterioration and Maintenance Effects - Models for Planning and Management*. 472 p. *World Bank. Washington (EUA)*, 1987.
- SAMSON, N.; LEVESQUE, W.; BÉGIN-DROLET, A.; LÉPINE, J. *Modelling and Mapping of Heavy-Vehicle Energy Consumption. In: Proc., 16th International Symposium on Heavy Vehicle Transport & Technology, HVTT16, Université Laval*. 2021.
- SAYERS, M. W; GILLESPIE, T. D; QUEIROZ, C. A. V. *The International Road Roughness Experiment - Establishing Correlation and a Calibration Standard for Measurements*. 468 p. *World Bank Technical Paper Number 45. Washington (EUA)*, 1986.
- SAYERS, M. W. *On the Calculation of International Roughness Index from Longitudinal Road Profile. Transportation Research Record 1501. p. 1-12. Washington (EUA)*, 1995.
- SVENSON, G.; FJELD, D. *The influence of road characteristics on fuel consumption for logging trucks. In: 12th International Symposium on Heavy Vehicle Transport Technology*, 2012.
- TAYLOR, G. W., PATTEN, J. D. *Effects of Pavement Structure on Vehicle Fuel Consumption – Phase III. Nation Research Council of Canada*, 2006.
- VELMURUGAN, S.; MADHU, E.; RAVINDER, K.; GANGOPADHYAY, S. Updation of Road User Cost for Economic Evaluation of Road Projects. *Indian Journal of Transport Management*. p. 205-225. *Jul-Sep 2009*.
- WATANATADA, T; HARRAL, C. G; PATERSON, W. D. O; DHARESHWAR, A. M; BHANDARI, A; TSUNOKAWA, K. *The Highway Design and Maintenance Standards Model – Vol1: Description of the HDM-3 Model*. 290 p. *Washington (EUA)*, 1987.