

## A INFLUÊNCIA DA IRREGULARIDADE DOS PAVIMENTOS NOS CUSTOS TOTAIS DE TRANSPORTE: ESTUDO DE CASO DE UMA RODOVIA DO RIO GRANDE DO SUL

**Carine Molz**  
**Celso Luiz dos Santos Romeiro Júnior**  
**Henrique Falck Grimm**  
**Lélio Antônio Teixeira Brito**  
**Lucas Fraporti Heller**  
**Marlova Grazziotin Johnston**  
**Mônica Regina Garcez**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura

### RESUMO

No contexto dos estudos dos pavimentos, o índice de irregularidade internacional (IRI) impacta diretamente sobre os custos dos usuários e da agência. Com auxílio de dados de campo e dos modelos propostos no software HDM-4, este estudo teve como objetivo analisar o impacto da irregularidade do pavimento nos custos de transporte, considerando um ciclo de vida de 30 anos. Assim, realizaram-se variações nas análises através de três cenários distintos, caracterizados por diferentes valores de IRI máximo admissível, sendo: (i) IRI=4m/km (Base), (ii) IRI=3,4m/km (Alternativa 1) e (iii) IRI=2,7m/km (Alternativa 2). Como respostas, o aumento da irregularidade exigiu manutenções menos frequentes, diminuindo os custos da agência. Em contrapartida, para o mesmo caso se observou aumento nos custos dos usuários, em especial nos gastos com reposição de peças e manutenção dos veículos. Em relação a análise econômica, ambas alternativas se mostraram menos viáveis que o cenário base, exibindo VPLs negativos.

### ABSTRACT

In the context of pavement studies, the international roughness index (IRI) directly impacts road user costs and road agency costs. With the help of field data and the models proposed by the HDM-4 software, this study aims to analyze the impact of pavement roughness on transport costs, considering a 30-year life cycle. Thus, variations were made in the analyzes through three distinct scenarios characterized by different values of maximum admissible IRI values, namely: (i) IRI=4m/km (Baseline), (ii) IRI=3.4m/km (Alternative 1) and (iii) IRI=2,7m/km (Alternative 2). In response, the increase in roughness led to less frequent maintenance, reducing agency costs. On the other hand, for the same scenario, there was an increase in user costs, especially with replacement of parts and vehicles maintenance of costs. Regarding the economic analysis, both alternatives were less viable than the baseline, showing negative NPVs.

### 1. INTRODUÇÃO

As rodovias brasileiras desempenham um papel essencial na economia do país, sendo caracterizadas como um importante sistema de escoamento de produção e circulação de pessoas. No entanto, segundo o relatório da Confederação Nacional dos Transportes (CNT, 2019), cerca de 52,4% das principais rodovias do Brasil apresentam problemas na camada de revestimento, sendo classificados como regulares, ruins ou péssimas. Essa falta de manutenção das estradas nacionais é uma barreira para o desenvolvimento do país, uma vez que um pavimento com péssimas condições afeta diretamente os custos dos usuários e do transporte de cargas e, assim, a competitividade da região.

O ciclo de vida de um pavimento pode ser dividido em etapas principais, as quais englobam o pré uso, o uso e o pós uso. Quando uma abordagem de ciclo de vida é aplicada nos estudos de uma rodovia, o impacto de cada fase é considerado e quantificado, destacando a relevância dos gastos de manutenção e preservação que ocorrem durante o uso no custo total do ciclo de vida do pavimento. Em outras palavras, em uma análise de custo do ciclo de vida (*life cycle cost*

*analysis – LCCA*) não são computados apenas as despesas ocorridas durante a construção e manutenção do pavimento (*road agency costs – RAC*), mas também o custo dos usuários (*road user costs – RUC*) devido às condições da camada de rolamento.

Em relação aos usuários, a quantidade de defeitos ou irregularidades da superfície do pavimento interferem diretamente no conforto proporcionado durante o tráfego e é considerada um indicador para julgar a condição do pavimento (Chen *et al.*, 2019). Da mesma forma, o veículo sofre com estas imperfeições, resultando em um aumento dos custos dos usuários, através de maiores gastos operacionais, com manutenção mecânica, com consumo de combustível e de pneus, com o tempo de viagem, dentre outros. Assim, atender a qualidade do revestimento também significa economia nos custos de transporte dos usuários (Bernucci *et al.*, 2008).

A relação entre a condição do pavimento e os custos do usuário da via é um assunto muito discutido em vários estudos (Martínez *et al.*, 2018; Khiavi e Mohammadi, 2018). Da mesma forma, modelos vem sendo desenvolvidos ao longo dos anos para estimar os gastos com cada componente dos custos dos usuários. Dentre estes, pode-se destacar o elaborado por Perrotta *et al.* (2019), o qual realiza uma modelagem para a calibração do HDM de acordo com o consumo de combustível dos veículos no Reino Unido. Em geral, a maioria desses custos é relacionada à irregularidade do revestimento, definida por Sayers *et al.* (1986) como “a variação na elevação da superfície que induz vibrações na travessia dos veículos”. Embora o conceito possa ser facilmente entendido, a obtenção de um valor numérico para a irregularidade pode não ser tão objetiva.

A necessidade de padronizar e correlacionar as medidas de irregularidade obtidas através de diferentes instrumentos levou ao *International Road Roughness Experiment (IRRE)*, organizado no Brasil em 1982 e patrocinado por várias instituições como a GEIPOT (Empresa Brasileira de Transporte Planejado), o Banco Mundial e o IPR/DNER (Instituto de Pesquisa Rodoviária do Departamento Nacional de Estradas). Para este experimento foram considerados 49 locais em que a irregularidade foi determinada com auxílio de diferentes equipamentos, sendo proposto ao final um único índice, denominado *Internacional Roughness Index (IRI)*, sendo atualmente considerado como oficial em todo mundo (Sayers *et al.*, 1986).

Segundo o DNER (1994), o IRI é definido como o somatório de todos os desvios em relação a um plano de referência longitudinal, interferindo diretamente na qualidade do revestimento, na aplicação de esforços dinâmicos na estrutura e na dinâmica dos veículos. Este parâmetro é considerado uma importante medida de rugosidade do pavimento, a qual pode ser aplicada para desencadear estratégias de manutenção, aprovar a execução de novas rodovias e reabilitações e, também, determinar o desempenho exigido de empresas contratadas (Chen *et al.*, 2019).

Sabendo-se dos impactos econômicos associados a irregularidade dos revestimentos, diversos estudos foram desenvolvidos. Dentre esses, Múčka (2017) realizou uma ampla análise através de pesquisa das especificações do IRI em diferentes países, considerando os valores limites de acordo com a classificação das rodovias, para estradas consideradas em serviço, e também para estruturas novas, reconstruídas e reabilitadas. Chen *et al.* (2019) desenvolveram um método sistemático para determinar os limites de IRI para pavimentos flexíveis, baseado na percepção de rugosidade superficial de cerca de 241 participantes, os quais foram escolhidos aleatoriamente. Ainda, Bala *et al.* (2017) avaliaram valores de IRI a fim de identificar a melhor estratégia de manutenção de rodovias vicinais no Nepal.

Modelos e métodos empíricos de desempenho são utilizados para o planejamento e a gerência de pavimentos, os quais mostram claramente a correlação entre a irregularidade do pavimento e os custos operacionais, tanto em relação à agência quanto aos usuários (Benucci *et al.*, 2008). Dentre estas ferramentas, destaca-se o software computacional desenvolvido pelo Banco Mundial: HDM-4 (*Highway Development and Management*). Este programa utiliza modelos de desempenho que simulam as condições físicas e econômicas do pavimento durante o período de análise, permitindo a avaliação da melhor alternativa de intervenção de manutenção ou restauração das rodovias.

Diante deste cenário, o presente estudo tem como objetivo avaliar o impacto de diferentes valores máximos de IRI nos custos dos usuários das rodovias (RUC) considerando os investimentos necessários por parte da agência, denominados custos das agências rodoviárias (RAC). A partir de dados da Rede Rodoviária do Estado do Rio Grande do Sul, uma análise de custo do ciclo de vida (LCCA) simplificada foi realizada considerando os resultados de desempenho do pavimento fornecidos pelos modelos HDM-4 ao longo de 30 anos. Por fim, a análise do IRI máximo admissível considerou 3 cenários distintos (2,7 m/km; 3,4 m/km; 4,0 m/km), causando diferentes RUC e RAC para cada simulação. Todos os custos foram analisados com base em uma perspectiva de montante ao longo do tempo.

## 2. DINÂMICA DA PESQUISA

O método adotado neste estudo foi subdividida em quatro etapas principais. Inicialmente se estabeleceu o cenário de tráfego e, para este contexto, dimensionou-se o respectivo pavimento com auxílio do método proposto pela AASHTO em 1993. A seguir, simulou-se o desempenho e os custos da estrutura considerada com base nos modelos disponíveis no software de gerenciamento de pavimentos HDM-4. Por fim, de posse dos dados fornecidos pelo programa, realizou-se uma análise LCCA a fim de mensurar o impacto para manter diferentes níveis de IRI máximos durante o ciclo de vida do pavimento. A Figura 1 ilustra um fluxograma da metodologia adotada na pesquisa.

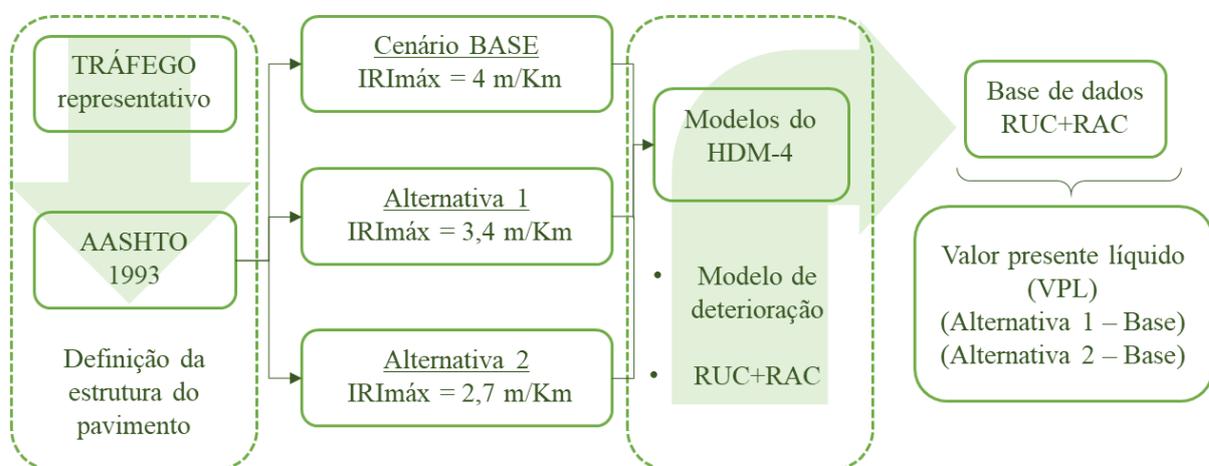


Figura 1: Método adotado no estudo

## 2.1. Cenários de Tráfego

Para este estudo, a composição da frota e suas características, assim como seus custos unitários operacionais, foram fornecidos pelo Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem (DAER/RS) baseado em estudos realizados pelo departamento em 2019. Com base nestes dados, a rede rodoviária estadual foi dividida em três grupos em termos de volume de tráfego diário médio anual (VDMA) bidirecional, os quais são apresentados através da Tabela 1.

**Tabela 1:** Classificação do nível de tráfego na frota estadual gaúcha

| Grupo | Volume de tráfego | VDMA (veículos/dia) |
|-------|-------------------|---------------------|
| 1     | Baixo             | < 1500              |
| 2     | Médio             | 1500 < VDMA < 3000  |
| 3     | Alto              | > 3000              |

Com base na Tabela 1, adotou-se como tráfego representativo da rede rodoviária avaliada o valor de VDMA intermediário do Grupo 2, sendo este de 2250 veículos/dia e fluxo bidirecional. O fluxo diário da rodovia considerado é de 1755 veículos de passeio (78%) e 495 veículos comerciais (22%), os quais englobam transporte coletivo e caminhões leves, médios, pesados e ultra pesados. Salienta-se que neste estudo optou-se pela análise da variação do IRI apenas para um cenário de tráfego, considerando os dados cedidos pelo DAER/RS.

## 2.2. Dimensionamento do Pavimento

Com objetivo de analisar o desempenho do pavimento, foi necessário projetar uma estrutura compatível, em termos de adequação estrutural, com o tráfego adotado. Desta forma, tornou-se necessário a aplicação de um método de dimensionamento de pavimento a fim de determinar a espessura da camada adequada para o VDMA adotado, buscando garantir um bom desempenho em um período de 30 anos.

Neste estudo, optou-se pelo método empírico de dimensionamento *AASHTO 1993 Pavement Design Method* (AASHTO, 1993), o qual é baseado nos dados de desempenho de campo das pistas experimentais do *AASHTO Road Test* (1958-1960). Essa metodologia busca principalmente a determinação de um número estrutural (*Structural Number* – SN) do pavimento, o qual deve ser suficiente para garantir seu bom desempenho em termos de manutenção durante o período de projeto considerando uma confiabilidade especificada.

O SN é resultado da soma da espessura de cada camada do pavimento multiplicada por seus coeficientes estruturais ( $a_i$ ) e, para camadas granulares, seus coeficientes de drenagem ( $m_i$ ). Portanto, com o valor de SN calculado e algumas suposições sobre os tipos de materiais, é possível determinar a espessura de cada camada do pavimento. As entradas utilizadas para executar o projeto do pavimento usando o Método AASHTO 1993 estão descritas na Tabela 2 e na Tabela 3.

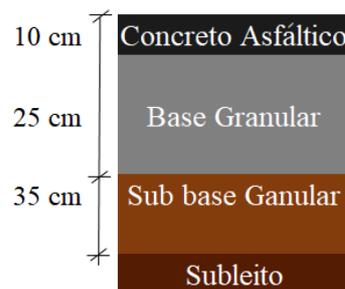
**Tabela 2:** Entradas utilizadas no dimensionamento através da AASHTO 93

|  |                        |
|--|------------------------|
| Cargas de Eixo Equivalente - ESAL (30 anos)                            | 2,18 x 10 <sup>7</sup> |
| Taxa de crescimento do tráfego (por ano)                               | 2,50%                  |
| Confiabilidade (R)   | 90%                    |
| Perda de capacidade de manutenção no final da vida útil - $\Delta$ PSI | 2,0                    |

**Tabela 3:** Dados dos materiais considerados para o dimensionamento

| Camada             | Módulo de resiliência<br>[psi] | Coef. estrutural<br>( $a_i$ ) | Coef. de drenagem<br>( $m_i$ ) |
|--------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Concreto Asfáltico | -                              | 0,44                          | -                              |
| Base Granular      | 42.850                         | 0,13                          | 1,0                            |
| Sub-base granular  | 21.400                         | 0,11                          | 1,0                            |
| Subleito           | 13.000                         | -                             | -                              |

Com base nos coeficientes e no módulo de resiliência dos materiais adotados para o dimensionamento do pavimento, apresentados na Tabela 2, a aplicação do método AASHTO 1993 resultou em um  $SN = 4,51$ . Da mesma forma, a estrutura do pavimento encontrada para este  $SN$  é apresentada na Figura 2, a qual foi utilizada na análise de desempenho pelos modelos HDM-4, descritos na seção a seguir.



**Figura 2:** Estrutura do pavimento projetada com AASHTO 93

### 2.3. Custos da Agência (RAC) e dos Usuários (RCU) utilizando os modelos do HDM-4

Com a estrutura do pavimento projetada para o tráfego considerado, representada na Figura 2, uma análise de desempenho foi realizada com auxílio do software HDM-4, a fim de prever os custos ocorridos durante o ciclo de vida do pavimento por um período de 30 anos. Nesse ponto, foram avaliados três cenários diferentes:

- Cenário base:  $IRI_{máx} = 4,0$  m/km;
- Alternativa 1:  $IRI_{máx} = 3,4$  m/km;
- Alternativa 2:  $IRI_{máx} = 2,7$  m/km.

As irregularidades analisadas neste estudo representam três condições diferentes do pavimento. O primeiro cenário, associado a um  $IRI = 4$  m/km, corresponde a uma maior gravidade dos defeitos superficiais do pavimento. O Cenário de  $IRI = 3,4$  m/km reproduz uma condição intermediária do revestimento. Por fim, o  $IRI = 2,7$  m/km descreve uma situação branda.

Considerou-se que, ao longo dos 30 anos, cada alternativa teve como objetivo avaliar o impacto financeiro de diferentes valores de  $IRI$ , tanto em termos de custos de agência quanto de usuários. Optou-se pela escolha de uma árvore de decisão simplificada, a qual considerou uma manutenção composta por uma fresagem e recomposição de 4,0 cm. Nos anos em que o pavimento atingir a irregularidade máxima admissível, deverá ocorrer uma obra de intervenção, reduzindo a irregularidade para 2 m/km. Vale ressaltar que não foram avaliados outros critérios de falha, como trincamento ou afundamento de trilha de roda (ATR).

Para os custos da agência (RAC) foram considerados apenas os custos de manutenção referentes à estratégia adotada, não considerando os custos de implantação da rodovia. Com relação aos custos dos usuários (RAC), o HDM-4 considera a soma de diversas parcelas, como consumo de combustível e pneus, custos de manutenção, horas trabalhadas e aguardando carga, dentre outros.

Por fim, salienta-se que todos os custos de manutenção foram cedidos pelo DAER e que, para adequação dos modelos de deterioração do HDM-4 à realidade brasileira, foram utilizados os coeficientes de calibração do DNIT para o clima temperado.

#### 2.4. Análise dos custos do ciclo de vida

A análise dos custos do ciclo de vida foi baseada nos dados de saída de cada cenário fornecido pelos modelos HDM-4 em termos de custos totais e cronogramas de manutenção, bem como custos de usuários. Cada alternativa avaliada deve refletir em um aumento nos custos da agência e na economia dos custos do usuário da rodovia, uma vez que o IRI máximo permitido em ambos os casos é menor que a alternativa base. A comparação desse fluxo de custos foi avaliada pelo indicador econômico Valor Presente Líquido (VPL), considerando uma taxa de desconto de 9,2% ao ano, a qual geralmente é adotada nos estudos rodoviários brasileiros.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A evolução da irregularidade por ano para cada uma das alternativas avaliadas, considerando os modelos do HDM-4, é exposta na Figura 3. Através do gráfico, nota-se uma queda acentuada do valor de IRI em certos anos, a qual representa o momento em que o modelo identifica a necessidade de uma intervenção de manutenção devido ao alcance do valor de IRI máximo estipulado, implicando em um investimento por parte da agência. Salienta-se que, ao atingir o gatilho e realizar a obra necessária, a irregularidade do pavimento diminui para 2 m/km, condição que foi fixa neste estudo.

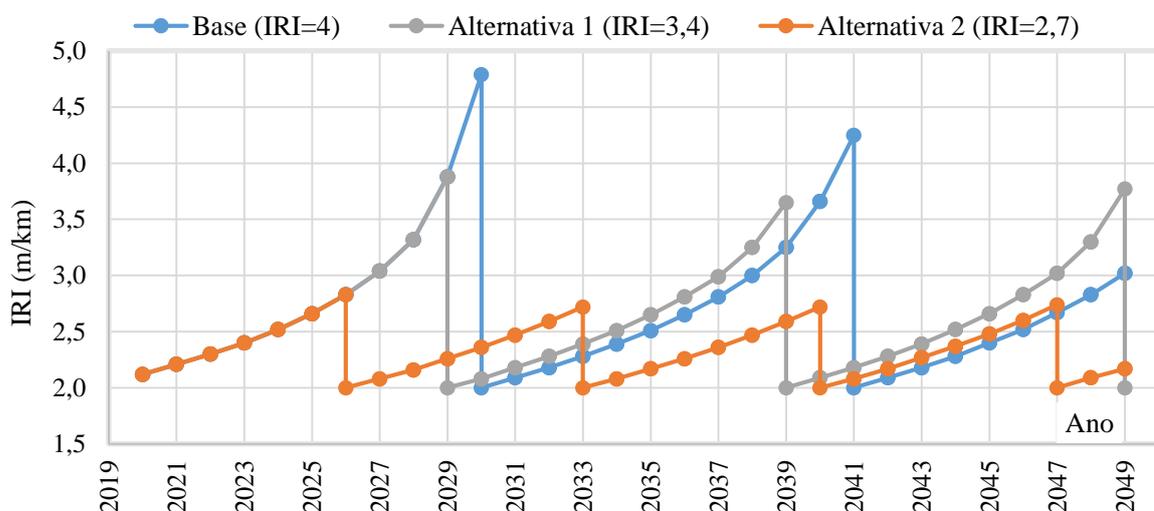


Figura 3: IRI (m/km) por ano de cada cenário

Considerando um período de análise de 30 anos, o qual iniciou no ano de 2020 e foi finalizado em 2049, observa-se que o cenário base necessitou de intervenções de manutenção nos anos de 2030 e 2041, demonstrando um intervalo de cerca de 11 anos entre as obras. Este cenário pode ser associado aos trabalhos iniciais de uma concessão rodoviária, com um IRI máximo

representativo de 4,0 m/km. Como o IRI admissível apresenta um valor maior, é coerente que sejam necessárias menos manutenções que as demais alternativas.

O Cenário referente à Alternativa 1 apresentou três momentos em que a manutenção seria vital para o atendimento da irregularidade em 3,4 m/km, o qual foi fixado como máximo. Neste caso, as obras se tornaram necessárias nos anos 2029, 2039 e 2049, exibindo um intervalo médio de 10 anos. Considerando estes períodos, observa-se que, em comparação ao cenário base, ocorre uma necessidade de antecipação das obras, refletindo um maior custo da agência em termos de valor presente.

Com relação ao cenário da Alternativa 2, o qual exibe uma menor tolerância à irregularidade da camada de rolamento ( $IRI_{m\acute{a}x} = 2,7$  m/km), os modelos do HDM-4 exigiram 4 intervenções associadas aos anos de 2026, 2033, 2040 e 2047. Neste caso, o intervalo entre as obras foi mais curto, sendo de cerca de 7 anos. De maneira geral, a manutenção de um menor valor de IRI provoca uma maior necessidade de obras no pavimento, aumentando assim os custos da agência.

O aumento da irregularidade com o tempo é influenciado por diferentes fatores considerados nos modelos propostos pelo HDM-4. Dentre estes, citam-se o percentual de área trincada, que engloba trincas térmicas e estruturais, o teor de “panelas”, o afundamento de trilho de roda, a resistência à derrapagem, dentre outros. Todas estas manifestações patológicas são agravadas com a passagem dos veículos, provocando assim o acréscimo do IRI. Quando o IRI atinge o máximo estipulado, as obras de manutenção proporcionam a melhoria do revestimento, e assim a redução deste defeitos superficiais.

Em referência aos custos dos usuários para cada alternativa avaliada, esses são associados à operação dos veículos e as variações no tempo de viagem, as quais englobam as horas gastas pelos usuários durante a jornada trabalhada, fora de horário de trabalho e aguardando a carga. Como não foram introduzidos dados relacionados a acidentes, estes foram desconsiderados das análises, não interferindo no custo total. A Figura 4 apresenta os principais componentes do RUC, em termos de valor presente, considerando 1000 veículos por quilômetro, os quais foram acumulados de acordo com o período de análise de 30 anos.

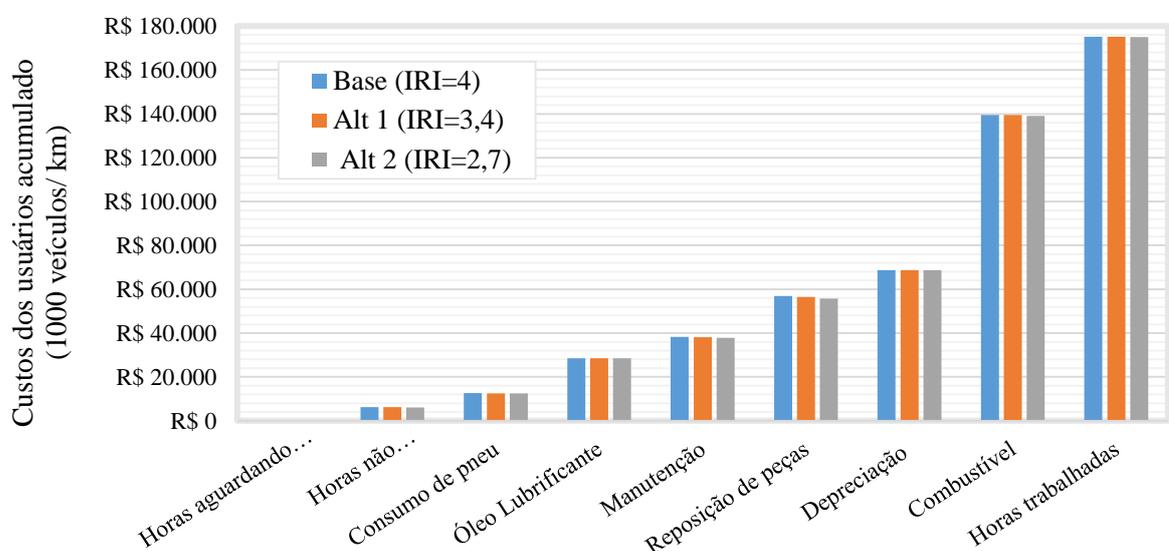
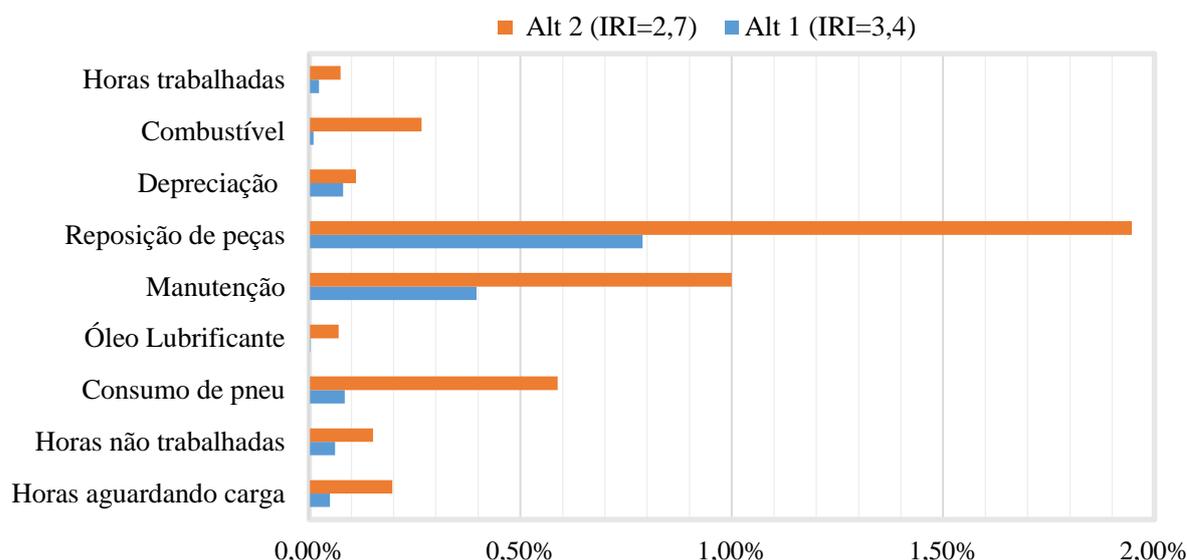


Figura 4: Composição dos custos dos usuários considerando 1000 veículos/km

Observa-se no gráfico que, para todos os cenários, os maiores valores de RUC são associados as horas trabalhadas e ao consumo de combustível. Os modelos do HDM consideram ambos fatores como uma função da velocidade de operação dos veículos, a qual é maior para revestimentos com menores irregularidade. Ainda, observa-se que conforme a exigência de irregularidade inferior no pavimento, o custo de cada componente individual diminui com uma margem muito pequena, sendo difícil a visualização destes valores através do gráfico. Entretanto, salienta-se que os menores custos dos usuários em termos totais demonstram uma maior viabilidade econômica do cenário da Alternativa 2, ou seja, do IRI=2,7 m/km.

A Figura 5 apresenta a composição percentual de cada parcela dos custos dos usuários considerando as diferenças entre o RUC do cenário base e as alternativas com menores valores de IRI. Nota-se que, embora os maiores valores unitários do RUC estejam relacionados as horas trabalhadas, conforme demonstra a Figura 4, a mudança de irregularidade provoca um acréscimo percentual de gastos diferente.

Verifica-se que o aumento da irregularidade provoca maiores gastos com reposição de peças e manutenção dos veículos para ambos cenários relativos as alternativas 1 e 2, com maior percentual de acréscimo associados a variação de um IRI=2,7 m/km para um IRI=4 m/km. O consumo de peças depende da irregularidade do pavimento, da quilometragem e dos ciclos de velocidade dos veículos. Considerando uma maior irregularidade, são necessários ajustes de velocidades pela frota durante o tráfego devido a pior condição superficial do revestimento, com oscilações entre ciclos de aceleração e desaceleração, provocando assim maiores desgastes mecânicos nos veículos.



**Figura 5:** Composição do RUC das diferenças de cada componente das Alternativas 1 e 2 em relação à base

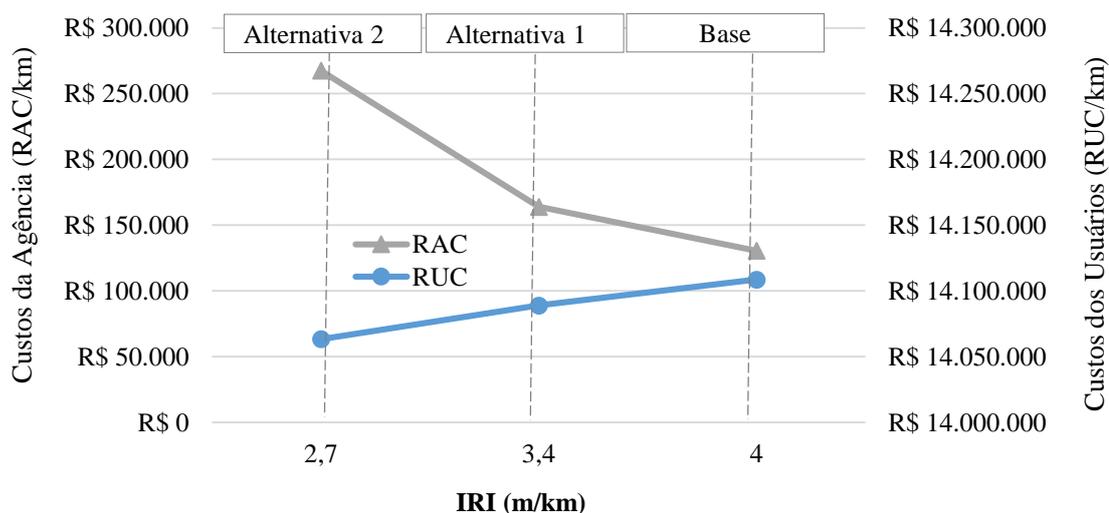
Da mesma forma, as variações das velocidades dos veículos devido ao aumento da irregularidade provocam maiores gastos com combustível. Avaliando a diferença percentual do RUC do IRI=2,7 m/km em relação ao IRI=4,0 m/km, observa-se que este fator representa cerca de 0,27% do aumento dos custos dos usuários. Considerando a diferença de custos entre o IRI=4,0 m/km e o IRI=3,4 m/km, o teor é muito menor, representando apenas menos de 0,02% do aumento total dos custos, sendo menor que os acréscimos associados à depreciação e a outros

fatores. Comprovando estes resultados, Perrotta et al. (2019) cita que o consumo de combustível é afetado pelas condições de infraestrutura da rodovia, considerando a resistência ao rolamento, como a irregularidade e macrotextura do revestimento.

A depreciação dos veículos, assim como os gastos com a manutenção mecânica, é maior para pavimentos com maiores variações de irregularidades, ou seja, para a diferença entre o IRI=2,7 m/km e o IRI= 4 m/km. Esse fator é sensível tanto à utilização do veículo quanto à sua vida útil, que por sua vez depende da velocidade do veículo e das condições da rodovia. Desta forma, considerando a diferença entre a alternativa base e a alternativa 1, o percentual de depreciação possui uma parcela maior do acréscimo de custos do que a comparação entre a base e a alternativa 2.

Considerando as horas trabalhadas, quanto maior a irregularidade superficial do pavimento, menor a velocidade de tráfego dos veículos e assim, aumenta-se a jornada trabalhada, conforme se observa na Figura 4 e na Figura 5. Por fim, com relação aos outros componentes, estes seguem a mesma tendência de aumento percentual com maiores diferenças de IRI, sendo representados pelos gastos com óleo lubrificante, consumo de pneus e as horas não trabalhadas e aguardando a carga.

A variação nos custos da agência (RAC) e dos usuários da rodovia (RUC) por quilômetro devido à alteração do IRI, considerando um período de 30 anos, é ilustrada através da Figura 6. É possível observar que os cenários referentes às alternativas 1 e 2, os quais são associados a menores valores de IRI, resultaram em economias aos usuários em relação a base, o qual considera um IRI máximo de 4,0 m/km. Ainda, à medida que a irregularidade máxima permitida diminui, o custo da agência aumenta, uma vez que as intervenções de manutenção se tornam mais frequentes ou precisam ser antecipadas.



**Figura 6:** Custos da Agência x Custos dos Usuários

Em termos de valor presente, as economias dos custos dos usuários por quilômetro em relação ao cenário base foram de R\$ 19.746,22/km e R\$ 45.291,08/km analisando as alternativas 1 e 2, respectivamente. Caso as premissas adotadas se aplicassem para toda a malha viária pavimentada administrada pela DAER-RS, cerca de 7.000 km, os custos dos usuários seriam diminuídos em cerca de R\$ 138.223565 e R\$ 317.037.530. Dessa forma, percebe-se que, quanto

maiores as extensões analisadas, mas expressivos se tornam as economias por parte dos usuários considerando a variação da irregularidade do revestimento.

Por fim, para realizar uma análise comparativa entre os cenários, utilizou-se o Valor Presente Líquido (VPL). Considerando uma taxa de desconto de 9,2%, foi avaliado se as alternativas 1 e 2 eram lucrativos em comparação com a base. Ou seja, verificou-se se a economia dos usuários seria maior que os aumentos nos custos da agência, tornando o VPL positivo. Os resultados obtidos através dos modelos do HDM-4 são descritos na Tabela 4.

**Tabela 4: VPL obtido através do HDM-4**

| Cenário comparativo                            | VPL (R\$)    | TIR (% por ano) |
|--|--------------|-----------------|
| Alternativa 1 (IRI=3,4m/km) – Base (IRI=4m/km) | - R\$ 14.000 | Sem solução     |
| Alternativa 2 (IRI=2,7m/km) – Base (IRI=4m/km) | - R\$ 92.000 | -81,1%          |

Em relação aos resultados do VPL e da TIR, as alternativas 1 e 2 demonstram baixa viabilidade de aplicação em relação ao cenário base, o qual exibe uma maior tolerância para a irregularidade. Avaliando apenas a TIR, para qualquer valor de taxa de desconto adotado um cenário com IRI=4 m/km se apresenta mais vantajoso que um IRI=3,4m/km. Para os retornos do software, as economias do RUC não apresentaram valores superiores ou iguais aos custos da agência.

#### 4. CONCLUSÕES

Em relação a composição acumulada dos custos dos usuários (RUC) em um período de análise de 30 anos, para todos os cenários simulados, os maiores custos são associados as horas trabalhadas, ao consumo de combustível, depreciação dos veículos, reposição de peças e manutenção, nessa ordem. Ainda, a variação da irregularidade provoca diferenças nos custos de cada componente individual das alternativas avaliadas, indicando que a condição da camada de rolamento influencia diretamente os usuários.

Considerando os custos dos usuários, conclui-se que esses aumentam quando maiores irregularidades são permitidas nas rodovias. Os gastos com a reposição de peças e a manutenção dos veículos representam a maior parcela destes acréscimos, associando-se especialmente as variações de velocidade provocadas pela pior condição superficial do revestimento.

Com relação a comparação entre os custos das agências e dos usuários, a manutenção de menores IRIs provoca maiores custos para agência, devido a necessidade de obras mais recorrentes, e economias aos usuários, pela melhor condição da rodovia.

Em termos de valor presente líquido (VPL), comparando as alternativas em relação ao cenário base, nenhuma das alternativas demonstrou maior viabilidade econômica que a base, exibindo VPLs e TIR negativos.

Por fim, a avaliação apresentada corresponde a apenas um nível de tráfego em termos de VDMA e para a composição da frota do estado do Rio Grande do Sul. Da mesma forma, considerou-se para todos os cenários a mesma estratégia de manutenção. Para trabalhos futuros, recomenda-se análises com diferentes níveis de tráfego e composição de frota, assim como a

escolha de uma árvore de decisão mais complexa, buscando uma melhor compreensão da influência da rugosidade do pavimento nos custos totais de transporte.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS – AASTHO. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. Washington, DC, EUA: AASTHO, 1993. 624 p. <https://habib00ugm.files.wordpress.com/2010/05/aashto1993.pdf>
- Bala, R., Gautam, G. S., & Tamrakar, G. B. S. (2017). Analysis of IRI value for assessment of optimum maintenance strategy for low traffic volume roads in Nepal. *Journal of Science and Engineering*, 4(June), 41–46. <https://doi.org/10.3126/jsce.v4i0.22380>
- Bernucci, L.; Motta, L. G.; Ceratti, J. A. P.; Soares, J. B. Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 2008. 504 p.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. Pesquisa CNT de rodovias 2019: relatório gerencial. Brasília: CNT: SEST: SENAT, 2019. Disponível em: <<https://pesquisarodovias.cnt.org.br/downloads/ultimaversao/gerencial.pdf>>
- Chen, D., Hildreth, J., & Mastin, N. (2019). Determination of IRI Limits and Thresholds for Flexible Pavements. *Journal of Transportation Engineering Part B: Pavements*, 145(2), 1–10. <https://doi.org/10.1061/JPEODX.0000113>
- DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM –DNER (1994) Medição da irregularidade de superfície de pavimento com sistemas – Procedimento. Departamento Nacional De Estradas De Rodagem. DNER-PRO 182/94. Ministério dos Transportes.
- Khiavi, A. K., & Mohammadi, H. (2018). Multiobjective Optimization in Pavement Management System Using NSGA-II Method. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 144(2), 04018016. <https://doi.org/10.1061/jpeodx.0000041>
- Martínez, A. J. T., Oliete Josa, S., Magrinyà, F., & Gauthier, J. M. (2018). Cost-effectiveness of enforcing axle-load regulations: The Douala-N'Djamena corridor in Sub-Saharan Africa. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 107(December 2016), 216–228. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2017.11.016>
- Můčka, P. (2017). International Roughness Index specifications around the world. *Road Materials and Pavement Design*, 18(4), 929–965. <https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1197144>
- Perrotta, F., Parry, T., Neves, L. C., Buckland, T., Benbow, E., & Mesgarpour, M. (2019). Verification of the HDM-4 fuel consumption model using a Big data approach: A UK case study. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 67, 109–118. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.11.001>
- Sayers, M. W., Gillespie, T. D., & Queiroz, C. A. V. (1986). International Road Roughness Experiment: a Basis for Establishing a Standard Scale for Road Roughness Measurements. *Transportation Research Record*, 76–85.

---

Carine Molz (carinemolz@hotmail.com / carine.molz@ufrgs.br)

Celso Luiz dos Santos Romeiro Júnior (celsoluizjr@gmail.com / celso.romeiro@ufrgs.br)

Henrique Falck Grimm (hfg Grimm@gmail.com / henrique.grimm@ufrgs.br)

Lélio Antônio Teixeira Brito (leliobrito@gmail.com / lelio.brito@ufrgs.br)

Lucas Fraporti Heller (heller.lucas@gmail.com / lucas.heller@ufrgs.br)

Marlova Grazziotin Johnston (marlova.johnston@ufrgs.br)

Mônica Regina Garcez (monica.garcez@ufrgs.br)

Programa de Pós Graduação em Construção e Infraestrutura – PPGCI, Universidade Federal do Rio Grande do Sul Porto Alegre, RS, Brasil