



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR
www.rapvenacor.com.br



25º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 48ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPV)

ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL REMANESCENTE DE PAVIMENTOS RÍGIDOS UTILIZANDO MODELOS DE DESEMPENHO DO HDM-4

DOI:

Rafael V. Mota¹; Rafael Chaves¹; Felipe F. Camargo¹ & André F. Vale¹

RESUMO

O Índice de Condição do Pavimento (ICP) é amplamente utilizado como um parâmetro para avaliar a condição global da superfície de pavimentos rígidos, servindo de base nos sistemas de gerência de pavimentos para a definição de planos de manutenção viáveis. Apesar de sua ampla utilização em concessões rodoviárias, existe uma carência de metodologias para estimar a evolução desse parâmetro e, conseqüentemente, a vida útil dos pavimentos rígidos em termos de sua condição de superfície. Este artigo aborda as atividades realizadas para monitorar e avaliar as condições dos pavimentos de concreto de cimento Portland de uma rodovia concessionada inserida no Estado de São Paulo, com o objetivo de estimar a vida útil remanescente e verificar a conformidade com os requisitos do edital de concessão. O estudo abrangeu um levantamento visual detalhado das patologias e a medição da irregularidade longitudinal no trecho de pavimento rígido. Com o intuito de se prever o desempenho dos pavimentos adotou-se o *Highway Development and Management* (HDM-4) sendo a progressão do ICP ao longo do tempo estimada a partir dos resultados do HDM-4 utilizando uma metodologia adaptada da *Federal Highway Administration* (FHWA). A partir disso, foi possível determinar a vida útil remanescente do pavimento utilizando-se a condição real do pavimento para calibrar o modelo de referência com vistas a se ter modelos que efetivamente representem a condição da via. Os resultados demonstram que a metodologia pode ser implantada como forma de se estimar a vida útil dos pavimentos rodoviários de concreto em termos de ICP através de simulações com o HDM-4.

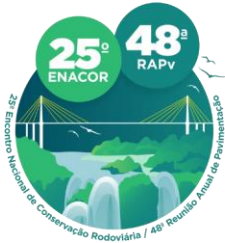
PALAVRAS-CHAVE: pavimento rígido; modelos de desempenho; índice de condição do pavimento; vida útil remanescente; gerência de pavimentos.

ABSTRACT

The Pavement Condition Index (PCI) is widely used as a parameter to assess the overall condition of rigid pavements, serving as a basis for pavement management systems to define viable maintenance plans. Despite its extensive use in road concessions, there is a lack of methodologies to estimate the evolution of this parameter and, consequently, the remaining service life of rigid pavements in terms of their surface condition. This paper addresses the activities carried out to monitor and evaluate the conditions of Portland cement concrete pavements on a concession highway in the state of São Paulo, aiming to estimate the remaining service life and verify compliance with concession requirements. The study included a detailed visual survey of distresses and measurement of longitudinal roughness on the rigid pavement section. To predict pavement performance, the Highway Development and Management (HDM-4) model was adopted, and the progression of the PCI over time was estimated using an adapted methodology from the Federal Highway Administration (FHWA). Based on this, it was possible to determine the remaining service life of the pavement by calibrating the reference model using the actual pavement condition to obtain models that effectively represent the road condition. The results demonstrate that the methodology can be implemented to estimate the service life of concrete road pavements in terms of PCI through simulations with HDM-4.

KEY WORDS: rigid pavement; performance models; pavement condition index; remaining service life; pavement management.

¹ RoadRunner, rafael.mota@rrunner.com.br; rafael.chaves@rrunner.com.br; felipe.camargo@rrunner.com.br; andre.vale@rrunner.com.br.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



INTRODUÇÃO

Os pavimentos rígidos são estruturas importantes na infraestrutura rodoviária, principalmente quando se trata de vias com tráfego muito pesado ou de corredores de ônibus. Essas estruturas são conhecidas pela sua durabilidade e resistência, mas como qualquer outro elemento, tem seu desempenho diminuído com o consumo de sua vida útil, o que exige intervenções de manutenção e reabilitação programadas por sistemas de gerência de pavimentos (SGPs) e definidas em projetos de restauração.

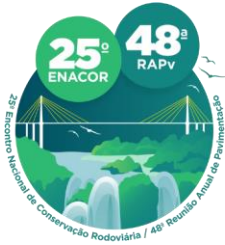
O núcleo de um SGP é avaliar rigorosamente a condição da rodovia e, a partir disso, fornecer planos de manutenção técnica e economicamente viáveis (LOPES *et al.*, 2015). Várias ferramentas têm sido empregadas para avaliar a condição do pavimento até o momento (BIDGOLI *et al.*, 2019; GANJI *et al.*, 2019; KHEIRATI; GOLROO, 2020; BISCONSINI; FERNANDES JÚNIOR, 2018; CASTELO BRANCO, 2016). De um modo geral, essas ferramentas podem ser divididas em abordagens manuais e automatizadas.

A avaliação de pavimentos depende da observação e registro de sua condição, das características identificadas na superfície e de sua condição estrutural. Essa avaliação pode ser feita de forma funcional ou estrutural. A análise funcional está relacionada à superfície de revestimento, onde são analisados os fatores que influenciam o uso do pavimento, afetando sua segurança e conforto (ARHIN *et al.*, 2015). Por outro lado, a avaliação estrutural está relacionada à capacidade de carga do pavimento, que pode estar ligada ao seu projeto ou dimensionamento (PINTO; PREUSSLER, 2001).

Para pavimentos asfálticos e de concreto de cimento Portland (CCP), os editais de concessão rodoviária exigem uma série de critérios que devem ser atendidos com base nas avaliações do pavimento. Nos contratos de concessão da Agência de Transporte do Estado de São Paulo (ARTESP), os pavimentos devem atender certos critérios de vida útil remanescente dependendo do ano de concessão da rodovia. Entretanto, não é indicado nos editais a forma com que se deve calcular este parâmetro para os pavimentos de CCP. No Brasil, utiliza-se corriqueiramente o Índice de Condição do Pavimento (ICP) como parâmetro do estado de conservação do pavimento, com base nos seus defeitos visuais. Este parâmetro subsidia a gestão dos pavimentos, bem como a definição das soluções de manutenção e recuperação necessárias.

Apesar da ampla utilização do ICP no Brasil e no mundo, existe uma lacuna significativa na literatura relacionada ao desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho deste parâmetro, sendo tipicamente definidos padrões de degradação locais a partir de série histórica de dados válidas para determinadas classes e/ou tipos de segmentos. Esses modelos são fundamentais para a tomada de decisões em relação à manutenção e à reabilitação de pavimentos, uma vez que permitem prever o comportamento futuro da estrutura e auxiliam na identificação de soluções mais eficientes e econômicas a serem executadas no melhor momento (MCNEIL *et al.*, 1992).

O presente estudo buscou determinar o ICP em campo e utilizar uma metodologia adaptada da *Federal Highway Administration* (FHWA), que estima este parâmetro de forma indireta através de índices simplificados, associando os modelos de previsão de desempenho do *Highway Development and Management* (HDM-4) para estimar a condição futura do pavimento em termos de ICP. Ao se propor esta metodologia busca-se uma sistemática apoiada em uma ferramenta de gestão e



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



planejamento de investimentos em rodovias amplamente utilizada em todo o mundo para se estimar a degradação dos pavimentos em termos de ICP, parâmetro de desempenho utilizado como requisito nos contratos de concessões rodoviárias brasileiras.

REVISÃO DA LITERATURA

O ICP é determinado conforme a norma DNIT 062/2004 – PRO (DNIT, 2004), que estabelece os procedimentos e critérios para realizar a avaliação objetiva de pavimentos rígidos, tendo como referência a metodologia desenvolvida pela *U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory* (CERL). O cálculo do ICP é dado conforme a equação 1 e depende da frequência e severidade dos defeitos nas placas de pavimento rígido inventariadas.

$$ICP = 100 - \sum_{i=j}^p \sum_{j=i}^{m_i} A(T_i, S_j, D_{ij}) F(t, q) \quad (1)$$

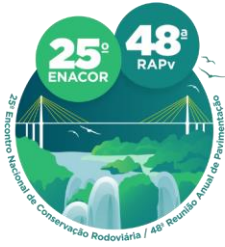
Onde:

ICP = Índice de Condição do Pavimento; A = valor deduzível, dependente do tipo do defeito (T_i), do grau de severidade (S_j) e da densidade de defeitos (D_{ij}); i = contador para tipos de defeitos; j = contador para graus de severidade; p = número total de placas defeituosas; m_i = número de graus de severidade para o tipo de defeito; $F(t, q)$ = uma função de ajustamento para defeitos múltiplos que varia com o valor deduzível somado (t) e o número de deduções (q).

O método de avaliação de defeitos no pavimento para determinação do ICP é amplamente utilizado no Brasil e foi aplicado por vários autores em seus estudos (SONCIM; FERNANDES JÚNIOR, 2015; LOPES *et al.*, 2015; ARHIN *et al.*, 2015; KIRBAS; KARASAHIN, 2017). A nível mundial, utiliza-se o *Pavement Condition Index* (PCI), uma variação muito próxima do índice brasileiro.

A fim de aprimorar os parâmetros para avaliar a condição do pavimento, adaptações foram feitas para facilitar o processo de coleta de dados. Pescador Júnior *et al.* (2018) realizaram avaliações objetivas e subjetivas de um pavimento com diferentes painéis de avaliadores. Os autores concluíram que a avaliação subjetiva pode ser usada para verificar a condição do pavimento, pois é um procedimento mais simples e ágil do que a avaliação objetiva usando o método PCI, uma vez que os resultados foram muito próximos em ambas as condições. Outro fator identificado foi que as maiores semelhanças entre as duas avaliações ocorreram onde os valores de PCI apresentavam uma nota média e a condição do pavimento estava entre regular e boa.

Na pesquisa de Pinatt *et al.* (2020), o PCI foi comparado por meio de avaliações objetivas e subjetivas de pavimentos urbanos utilizando Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Os métodos foram comparados entre si usando o coeficiente de correlação de Pearson. Observou-se que 92,21% das seções foram classificadas como "muito boas" a "razoáveis", enquanto 7,94% foram classificadas como "ruins" ou "muito ruins". Foi possível comprovar a similaridade entre os resultados das avaliações objetiva e subjetiva a partir da correlação de Pearson. Assim, o estudo concluiu que o PCI pode ser determinado de forma mais rápida e simples por meio de avaliações subjetivas. As avaliações subjetivas são indicadas para cidades onde a manutenção é realizada sem nenhum planejamento, sendo uma forma simplificada de avaliar o pavimento e obter bons resultados.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



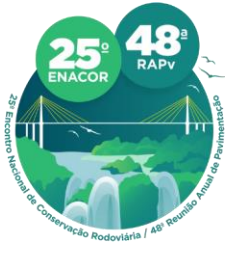
Ainda com vista à simplificação do método de avaliação da condição do pavimento, diversos estudos foram desenvolvidos com o objetivo de se obter o ICP de forma indireta, a partir de outros parâmetros funcionais do pavimento. No estudo de Kirbas e Karasahin (2017), o valor do PCI foi estimado a partir de dados de vibração, em que o componente de irregularidade da superfície foi avaliado por meio de análise de dados dos veículos e modelos teóricos de previsão. Em todas as análises do modelo, os resultados foram estatisticamente aceitos como significativos, demonstrando ser mais um método que facilita o processo de avaliação da condição do pavimento.

Arhin *et al.* (2015) também encontraram uma maneira simplificada de avaliar pavimentos, estimando o valor do PCI a partir dos valores de irregularidade longitudinal (IRI). Isso foi possível por meio de equações estatísticas, utilizando o método de regressão de mínimos quadrados. Foram desenvolvidos modelos PCI-IRI para diferentes condições, vias com diferentes classes funcionais e tipos de pavimento. Elhadidy, El-Badawy e Elbeltagi (2019) utilizaram o banco de dados do *Long-Term Pavement Performance* (LTPP) para desenvolver um modelo de regressão simplificado que relaciona o PCI com o IRI. Um total de 1208 seções foram utilizadas para o desenvolvimento do modelo, enquanto 240 seções foram utilizadas para a validação do modelo. Uma função sigmoide foi encontrada para expressar melhor a relação entre PCI e IRI, com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,995.

A FHWA (BEKTAS; SMADI; AL-ZOUBI, 2014) documentou em seu estudo as atividades realizadas para a avaliação, desenvolvimento e aprimoramento das informações sobre a condição do pavimento do Departamento de Transportes de Iowa (DOT), em que foi proposto um novo e simplificado sistema de classificação da condição do pavimento. O sistema proposto de escala 100, igual ao PCI, é baseado em cinco índices individuais derivados de dados específicos de deterioração e propriedades do pavimento, e um índice geral de condição do pavimento, PCI-2, que combina os índices individuais usando fatores de ponderação. Os diferentes índices abrangem trincamento, qualidade de rodagem, irregularidade longitudinal, deformação e atrito.

Atualmente, os métodos de previsão de desempenho do ICP baseiam-se principalmente em modelos empíricos e estatísticos, que apresentam limitações em termos de precisão e confiabilidade. Por outro lado, existem estudos que propõem o uso de técnicas de aprendizado de máquina, como redes neurais e árvores de decisão, para o desenvolvimento de modelos de previsão do ICP (KHEIRATI; GOLROO, 2022; ISSA; SAMANEH; GHANIM, 2022; SHAHNAZARI *et al.*, 2012). Essas técnicas apresentam vantagens em relação aos modelos tradicionais, uma vez que permitem o uso de uma grande quantidade de dados e consideram múltiplos fatores simultaneamente, como o clima, o tráfego e as propriedades dos materiais utilizados. No entanto, esses estudos ainda são limitados e precisam ser aprimorados para que possam ser aplicados em larga escala.

Em análises gerenciais, os modelos de previsão de desempenho do HDM-4 são amplamente utilizados. O HDM-4 é um modelo computacional que simula as condições físicas e econômicas do modo de transporte rodoviário em um determinado período de análise, geralmente a vida útil em serviço da rodovia, para uma série de alternativas de intervenções e cenários de investimentos. É uma ferramenta para a avaliação das estratégias de construção e manutenção de rodovias pavimentadas e não pavimentadas. O HDM-4, que resultou de estudos coordenados pelo Banco Mundial, trata-se não apenas de um programa computacional, mas também a mais extensa pesquisa empírica sobre os custos da modalidade rodoviária, que incluem normas de construção e



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



manutenção de rodovias, características de tráfego, modelos de previsão de deterioração das rodovias e operação dos veículos (DNIT, 2011).

A modelagem de desempenho dos pavimentos contida no programa tem conceitos empírico-mecanísticos que permitem determinar a evolução anual de parâmetros técnicos para pavimentos com revestimento asfáltico e rígidos. O HDM-4 foi concebido para diferentes ambientes e permite ser configurado para condições locais, sendo sua flexibilidade um atributo que procura refletir a realidade dos casos estudados. O *software* simula a condição futura das rodovias a partir de condições atuais, onde a confiabilidade dos resultados depende fundamentalmente dos dados de entrada que representam as condições da rede e da aplicação correta das previsões do modelo.

O HDM-4, entretanto, não estima diretamente o ICP do pavimento rígido. Para este tipo de estrutura é possível determinar a evolução de parâmetros tais como o trincamento das placas, o escalonamento, o esborcinamento de juntas e a irregularidade longitudinal.

Em suma, a ausência de modelos consagrados de previsão de desempenho do ICP representa uma limitação significativa para o gerenciamento de pavimentos em todo o mundo. Na prática empregam-se modelos locais empíricos particularizados com séries históricas e há esforços de pesquisas para o desenvolvimento de soluções com inteligência artificial, mas há a carência de metodologia que se permita sistematizar a consideração deste parâmetro na gerência de redes viárias com ampla aceitação.

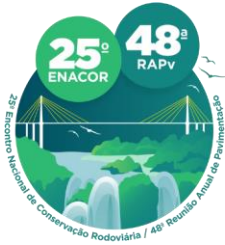
DADOS E METODOLOGIA

O estudo foi realizado em um trecho de pavimento rígido de uma rodovia concessionada no estado de São Paulo, caracterizada pelo tráfego pesado e clima tropical. A definição dos segmentos de análise considerou a escolha de seções quilométricas, tal qual o critério de avaliação do contrato. Foram analisadas 50 seções de até 1 km em segmentos descontínuos ao longo da via, incluindo os sentidos crescente e decrescente da rodovia.

A avaliação objetiva usando o método ICP foi realizada em setembro de 2022 com base na norma do DNIT 062/2004 – PRO (DNIT, 2004). Durante a coleta de dados, os defeitos visualizados foram registrados com seu nível de severidade e frequência em um formulário de verificação a cada metro, registrando-se os defeitos placa a placa. Os códigos e os tipos de defeitos avaliados foram:

- | | |
|-----------------------------------|------------------------------------|
| 1) Alçamento das placas, | 11) Bombeamento, |
| 2) Fissura de canto, | 12) Quebras localizadas, |
| 3) Placa dividida, | 13) Passagem de nível, |
| 4) Degrau na junta, | 14) Rendilhado e escamação, |
| 5) Defeito na selagem das juntas, | 15) Fissuras de retração plástica, |
| 6) Desnível c/ acostamento, | 16) Quebra de canto, |
| 7) Fissuras lineares, | 17) Esborcinamento de juntas, |
| 8) Grandes reparos, | 18) Placa bailarina, |
| 9) Pequenos reparos, | 19) Assentamento, e |
| 10) Desgaste superficial, | 20) Buracos. |

A partir dos dados coletados, determinou-se o ICP por seção de faixa para comparação com o limite do edital de concessão, que estabelece um ICP mínimo aceitável de 70. Já para a determinação da



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



evolução dos defeitos dos pavimentos rígidos, foram utilizados os modelos do sistema HDM-4 para pavimentos rígidos.

Destaca-se que para a construção do banco de dados, além de se considerar os dados da estrutura de pavimento existente no local, foi realizada a configuração voltada para a região de estudo incluindo por exemplo a definição do clima, coeficientes de calibração, entre outros. Os dados que representam as condições climáticas interferem significativamente no efeito da deterioração do pavimento e, portanto, foram utilizados dados que representassem o clima tropical da região do estudo. O volume médio diário de veículos comerciais (VMDc) da rodovia em questão e considerado no *software* varia entre 1.400 e 2.650 entre os segmentos avaliados com taxa de crescimento de 2% ao ano.

No que se refere à previsão da evolução anual dos parâmetros, foram utilizados os coeficientes de calibração padrão do HDM-4 para pavimentos de concreto de cimento Portland, sendo compatível com a condição do trecho em estudo.

Aqui vale a ressalva que, conforme exposto anteriormente, o HDM-4 não estima diretamente o ICP do pavimento rígido. Para este tipo de estrutura é possível determinar a evolução de parâmetros, tais como o trincamento das placas, o escalonamento, o esborcinamento de juntas e a irregularidade longitudinal. Portanto, para a obtenção da curva de desempenho do ICP, utilizou-se a formulação apresentada no estudo da FHWA (BEKTAS; SMADI; AL-ZOUBI, 2014), que relaciona o trincamento, o escalonamento e a irregularidade longitudinal (IRI) com o PCI do pavimento rígido, parâmetros cujo HDM-4 possui modelos de desempenho. O PCI proposto no estudo em questão é apresentado na equação 2.

$$PCI = 0,40 \times (Cracking Index) + 0,40 \times (Riding Index) + 0,20 \times (Faulting Index) \quad (2)$$

Onde:

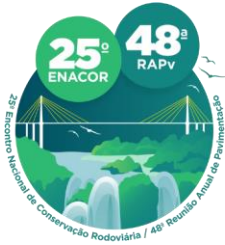
Cracking Index, índice dependente do percentual de trincamento na placa;

Riding Index, índice dependente da irregularidade longitudinal;

Faulting Index, índice dependente do escalonamento entre as placas.

Em pavimentos rígidos, o *Cracking Index* é definido pela severidade e frequência das trincas transversais e longitudinais das placas de concreto. Neste estudo, o *Cracking Index* foi adaptado e representa o percentual de trincamento nas placas, podendo ser fissuras de canto, superficiais ou lineares. O *Riding Index* é baseado nas medições do *International Roughness Index* (IRI), expressas em uma escala de 100. Valores de IRI abaixo de 0,5 m/km são considerados como 100; enquanto valores acima de 4,0 m/km são 0 na escala do índice. Um IRI abaixo de 1,5 m/km, considerado bom, corresponde a valores do *Riding Index* acima de 65. Por outro lado, IRI acima de 2,7 m/km, considerado ruim, corresponde a valores do *Riding Index* abaixo de 35. O *Faulting Index* usa as medições de escalonamento e é baseado em uma escala de 100. O valor limite de 12 mm é definido como 0 na escala.

Como premissa, considerou-se o ICP calculado pela norma DNIT 062/2004 – PRO igual ao PCI, apesar de haver pequenas diferenças na obtenção desses índices. A previsão de desempenho do IRI foi determinada no HDM-4 a partir dos dados do levantamento da irregularidade longitudinal da



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR
www.rapvenacor.com.br



via. Realizou-se, também, a estimativa da condição dos parâmetros de escalonamento e placas trincadas com base no inventário realizado para determinação da condição atual da via pela metodologia do DNIT. Tal estimativa tem como base o percentual de ocorrência de cada defeito e severidade nas placas dos segmentos quilométricos. O peso de cada severidade é detalhado a seguir.

- **Escalonamento, em mm (Código 4 no ICP)**
 - Severidade Baixa: 6,5
 - Severidade Média: 15
 - Severidade Alta: 20
- **Placas trincadas, em % (Junção de 3 defeitos)**
 - Fissura de Canto (Código 2 no ICP) – % de placas por km
 - Fissura Lineares (Código 7 no ICP) – % de placas por km
 - Fissura Superficiais (Código 14 no ICP) – % de placas por km

Para maior aderência do ICP calculado em função dos índices de trincamento, irregularidade longitudinal e escalonamento, a equação da FHWA foi calibrada utilizando o ICP da avaliação objetiva, obtido a partir do levantamento visual detalhado das placas de pavimento rígido dos segmentos em estudo.

Para a avaliação de Vida Útil Remanescente dos pavimentos rígidos em questão, foram utilizadas as evoluções dos parâmetros do trincamento, irregularidade longitudinal e escalonamento obtidas por meio do HDM-4 e os ICP's anuais foram estimados utilizando a metodologia da FHWA adaptada. De acordo com os critérios da ARTESP, a análise da vida remanescente dos pavimentos rígidos existente deve ser realizada com base nos índices levantados e parâmetros de projeto para o horizonte de projeto considerado até o início da próxima intervenção no pavimento. Para o caso específico em questão, a análise se deu para um período de 10 anos.

RESULTADOS

A partir da avaliação objetiva do pavimento rígido, foi determinado o ICP atual de cada segmento de análise, que são apresentados na Figura 1.

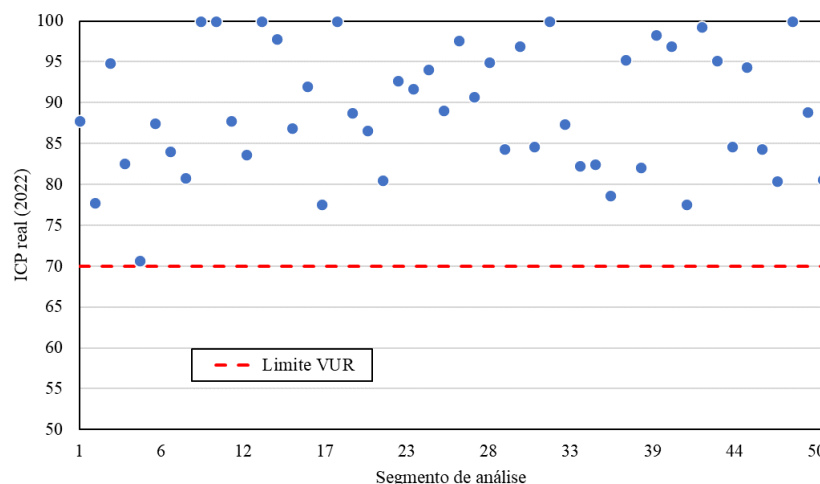
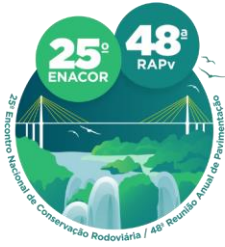


Figura 1: ICP real (levantamento visual detalhado de 2022)



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Observa-se que o valor mínimo do ICP foi de aproximadamente 71 para os 50 segmentos de análise. Além disso, há diversos segmentos com ICP superior a 85 (62% dos segmentos avaliados), indicando uma boa condição do pavimento em todo o trecho de estudo e 100% de conformidade com o contrato de concessão.

A partir dos resultados acima e, como forma de validar a metodologia proposta pela FHWA para estimar o PCI por meio do trincamento, irregularidade e escalonamento dos pavimentos, os PCI's foram estimados com base nos defeitos observados em campo e comparados com o PCI obtido por meio da avaliação com a norma do DNIT. Os resultados obtidos segmento a segmento são apresentados na Figura 2.

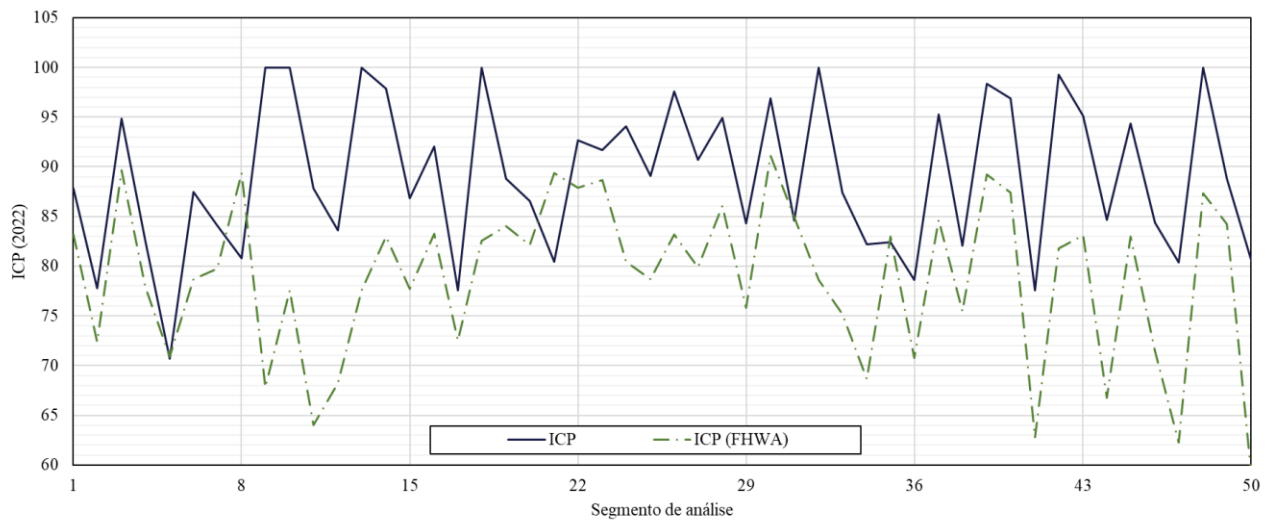


Figura 2: Comparativo entre ICP real e ICP do modelo da FHWA do ano de 2022

Como pode-se observar, o ICP estimado pela metodologia da FHWA apresentou uma certa variabilidade em relação ao ICP medido em campo (ICP real). Em função desses resultados e, para maior aderência do ICP estimado com a condição da via, a equação da FHWA foi calibrada utilizando o ICP da avaliação objetiva, obtido a partir do levantamento visual detalhado das placas de pavimento rígido dos segmentos em estudo.

$$ICP_{calibrado} = k1 \times (Cracking Index) + k2 \times (Riding Index) + k3 \times (Faulting Index) \quad (3)$$

Os coeficientes $k1$, $k2$ e $k3$ da equação foram obtidos de modo a se diminuir o erro médio quadrático (RMS), conforme a equação 4.

$$Erro(RMS) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left(\frac{d_{calculado} - d_{medido}}{d_{medido}} \right)^2} \quad (4)$$

A Tabela 1 apresenta os coeficientes utilizados para o cálculo do ICP em função do trincamento, irregularidade e escalonamento, assim como o erro de cada estimativa com relação ao ICP real, ao passo que os resultados obtidos segmento a segmento para o ICP calibrado e o ICP real são apresentados na Figura 3.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br

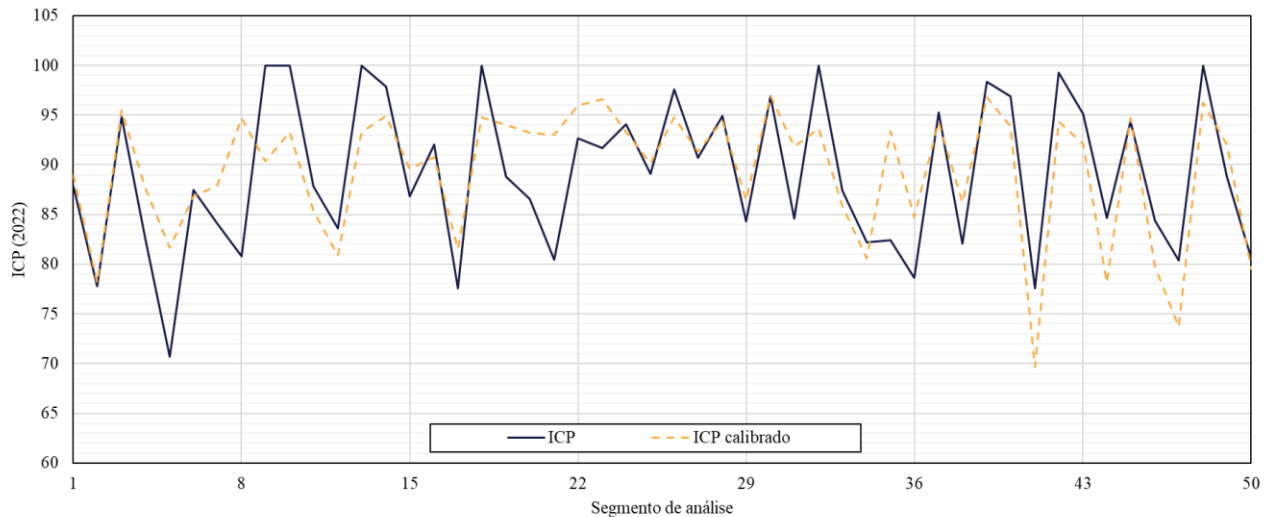


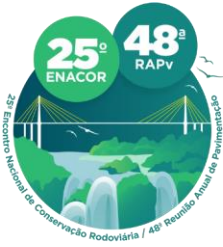
Figura 3: Comparativo entre ICP real e ICP calibrado do ano de 2022

Tabela 1: Coeficientes e erro da estimativa do ICP pelas diferentes equações

Parâmetro	ICP (FHWA)	ICP calibrado
k1	0,40	0,53
k2	0,40	0,12
k3	0,20	0,35
Erro (RMS)	14,1%	6,3%

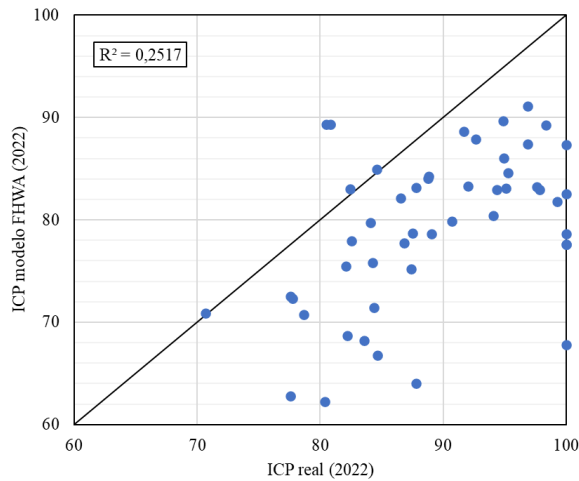
Como pode-se observar, o ICP calibrado apresentou maior aderência com o ICP real. A partir da calibração dos coeficientes de cada parâmetro do modelo da FHWA, foi possível reduzir o erro RMS de 14,1%, obtido para a equação original da FHWA, para um erro RMS de 6,3%. Além disso, observa-se que os valores individuais estão mais próximos quando se utiliza a equação calibrada, com comportamento mais aderente à condição real dos pavimentos avaliados.

A Figura 4(a) apresenta o comparativo do ICP considerando a equação proposta na publicação da FHWA (BEKTAS; SMADI; AL-ZOUBI, 2014) e da equação calibrada com os dados do levantamento visual detalhado de 2022, ao passo que a Figura 4(b) apresenta o comparativo do ICP calibrado com o real.

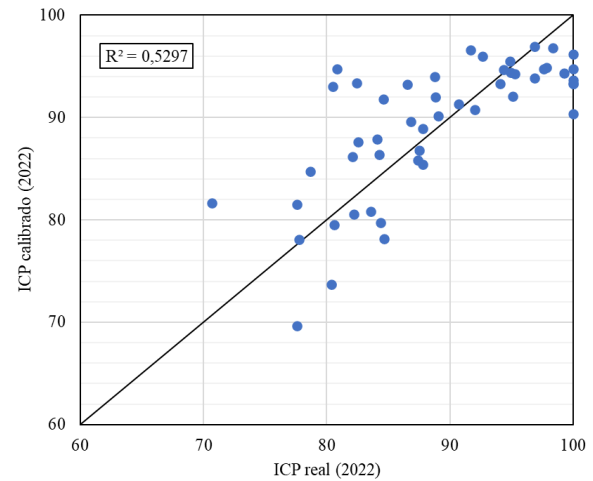


19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



(a)



(b)

Figura 4: Comparação do ICP real (levantamento visual detalhado de 2022) e: (a) ICP estimado pela equação da FHWA, (b) ICP estimado pela equação calibrada

Como pode-se observar, os valores de ICP estimados a partir da equação calibrada se concentram ao longo da linha de igualdade, ao passo que os valores de ICP estimados pela equação da FHWA tendem a se concentrar abaixo da linha, ou seja, o modelo da FHWA subestima o ICP real. Não obstante, considerando uma linha de tendência linear, obtém-se o R^2 igual a 0,53 da equação calibrada, o que indica uma melhora na estimativa do ICP em relação ao modelo de referência para a rodovia em questão (R^2 igual a 0,25).

Após a obtenção do ICP real, foram utilizados os modelos de previsão de desempenho do HDM-4 para determinar a evolução do trincamento, da irregularidade longitudinal e do escalonamento das placas de pavimento rígido em cada segmento de análise. A partir da evolução dos parâmetros, foi possível estimar o ICP anual com base na equação calibrada e, conseqüentemente, determinar a Vida Útil Remanescente (VUR) do pavimento rígido em termos de ICP. A Figura 5 ilustra o ICP previsto para o 10º ano de análise, juntamente com o limite de VUR para cada segmento avaliado.

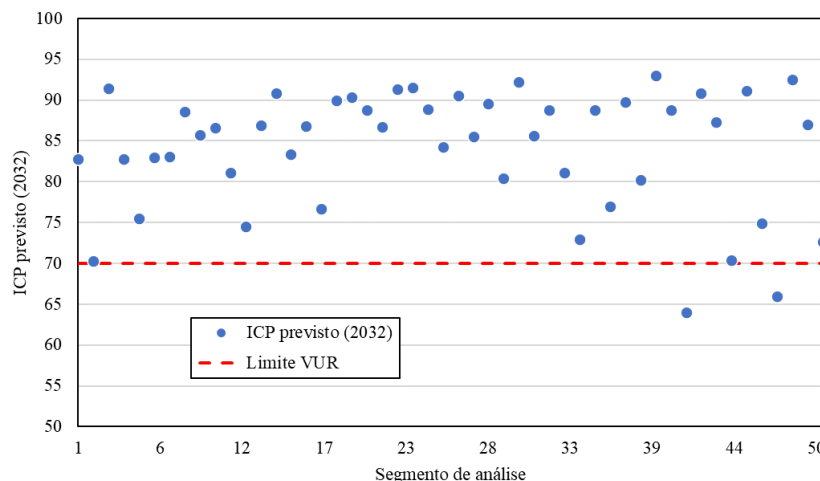
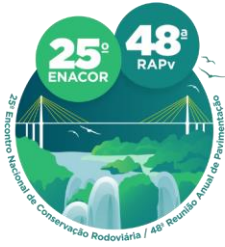


Figura 5: Previsão de desempenho do ICP e VUR dos segmentos de análise



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR
www.rapvenacor.com.br



Ao adotar um valor mínimo de ICP igual a 70, que indica a necessidade de intervenção de recuperação do pavimento e o fim de sua vida útil de acordo com os critérios exigidos no trecho concedido, constata-se que apenas dois dos segmentos avaliados (4%) apresentaram uma VUR inferior a 10 anos.

Com base nos resultados obtidos, foi possível verificar que os pavimentos, de maneira geral, apresentaram conformidade em termos de ICP ao longo do período de análise, sendo necessárias somente ações de conservação para manutenção das condições de superfície dos pavimentos avaliados. Nos segmentos de não conformidade, ações preventivas foram recomendadas de forma a adequar os pavimentos e atender aos critérios de contrato.

CONCLUSÕES

Este estudo apresentou uma metodologia adaptada para determinar a vida útil remanescente de pavimentos rígidos utilizando modelos de desempenho do HDM-4 e da FHWA para uma rodovia concessionada de tráfego pesado no estado de São Paulo. Foi destacada a importância do ICP como um parâmetro fundamental para avaliar a condição de pavimentos rígidos, como também a necessidade de aprimorar os modelos de previsão de desempenho deste parâmetro, visando oferecer soluções mais eficientes e econômicas para a gestão de pavimentos.

Por meio de um levantamento visual detalhado e da medição da irregularidade longitudinal, foi possível calcular a vida útil remanescente dos pavimentos de CCP e verificar o atendimento da rodovia em estudo ao critério de vida útil dos editais de concessão da ARTESP. A metodologia adaptada da FHWA foi empregada para calcular o índice de condição do pavimento, utilizando modelos de previsão de desempenho do HDM-4. A calibração do modelo de referência, com base nas condições reais do pavimento, resultou em estimativas com maior confiabilidade, garantindo que os resultados refletissem a realidade do pavimento em análise com maior aderência. Os resultados obtidos demonstraram a aplicabilidade da sistemática proposta na determinação da vida útil do pavimento rígido em termos de ICP empregando-se o HDM-4 como ferramenta de modelagem.

É importante ressaltar que, apesar de se mostrar uma metodologia promissora, os coeficientes de calibração obtidos são altamente dependentes da amostragem utilizada na estimativa do ICP, sendo a confiabilidade dos resultados melhorada conforme se aumenta o número de amostras. Nesse sentido, os resultados apresentados neste estudo devem ser utilizados com cautela e, para sua reprodução, faz-se necessário a utilização de um novo e mais abrangente conjunto de dados, bem como uma avaliação de sensibilidade de parâmetros que possam influenciar os resultados finais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Neami, M. A.; Al-Rubae, R. H.; Kareem, Z. Evaluation of pavement condition index for roads of Al-Kut City. *International Journal of Current Engineering and Technology*, v. 7, n. 4, p. 1461-1467, 2017.
- Arhin, S. A.; Williams, L. N.; Ribbiso, A.; Anderson, M. F. Predicting pavement condition index using international roughness index in a dense urban area. *Journal of Civil Engineering Research*, p. 10-17, 2015.
- Bektas, F.; Smadi, O.; Al-Zoubi, M. Pavement management performance modeling: Evaluating the existing PCI equations. *Institute for Transportation at Iowa State University Project Reports*. 2014.
- Bidgoli, M. A.; Golroo, A.; Nadjar, H. S.; Rashidabad, A G.; Ganji, M. R. Road roughness measurement using a cost-effective sensor-based monitoring system. *Autom. Constr.*, v. 104, p. 140-152, 2019. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2019.04.007>.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



- Bisconsini, D. R.; Fernandes Júnior, J. L. F. Monitoramento de pavimentos com smartphones. In: 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET, Gramado, 2018, p. 1321-1324.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 060/2004 - PRO: pavimento rígido - inspeção: procedimento. Rio de Janeiro: IPR, p. 29, 2004.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Manual de gerência de pavimentos. Rio de Janeiro, p. 189, 2011. (IPR. Publ. 745).
- Elhadidy, A. A.; El-Badawy, S. M.; Elbeltagi, E. E. A simplified pavement condition index regression model for pavement evaluation. *International Journal of Pavement Engineering*, 22(5), 643-652, 2021.
- Ganji, M. R.; Golroo, A.; Sheikhzadeh, H.; Ghelmani, A.; Bidgoli, M. A. Dense-graded asphalt pavement macrotexture measurement using tire/road noise monitoring. *Autom. Constr.*, v. 106, p. 102887, 2019. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2019.102887>.
- Issa, A.; Samaneh, H.; Ghanim, M. Predicting pavement condition index using artificial neural networks approach. *Ain Shams Engineering Journal*, Volume 13, Issue 1, 2022, 101490, ISSN 2090-4479. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.04.033>.
- Kheirati, A.; Golroo, A. Low-cost infrared-based pavement roughness data acquisition for low volume roads. *Autom. Constr.*, v. 119, p. 103363, 2020. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2020.103363>.
- Kheirati, A.; Golroo, A. Machine learning for developing a pavement condition index. *Automation in Construction*, v. 139, p. 104296, 2022. ISSN: 0926-5805, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104296>.
- Kirbas, U.; Karasahin, M. Estimating PCI using vibration data for asphalt concrete pavements. In: 2nd World Congresso on Civil, Structural, and Environmental Engineering, 2017.
- Lopes, S. B.; Pfaffenbichler, P.; Emberger, G.; Riedl, L.; Fernandes Júnior, J. L. Gerência de pavimentos urbanos com uso de modelagem dinâmica de sistemas diretamente conectada com um SIG, 2015.
- McNeil, S.; Markow, M.; Neumann, L.; Ordway, J.; Uzarski, D. Emerging Issues in Transportation Facilities Management. *Journal of Transportation Engineering*, v. 118, n. 4, p. 477-495, 1992.
- Pescador Júnior, A. C.; Silva Júnior, C. A. P.; Fontenele, H. B. Comparação de métodos de avaliação da condição de pavimentos flexíveis com o auxílio de um SIG-T. *CIATEC*, v. 10, p. 95-103, 2018.
- Pinatt, J. M.; Chicati, M. L.; Ildefonso, J. S.; Filetti, C. R. G. D. Evaluation of pavement condition index by different methods: Case study of Maringá, Brazil. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, v. 4, p. 100100, 2020. ISSN: 2590-1982.
- Pinto, S.; Preussler, E. *Pavimentação Rodoviária, Conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis*. 1. ed. Rio de Janeiro: COPIARTE, 2001.
- Shahnazari, H.; Tutunchian, M. A.; Mashayekhi, M.; Amini, A. A. Application of soft computing for prediction of pavement condition index. *Journal of Transportation Engineering*, 138(12), 1495-1506, 2012.
- Soncim, S. P.; Fernandes Júnior, J. L. Modelo de previsão do índice de condição dos pavimentos flexíveis. *Journal of Transport Literature*, v. 9, p. 25-29, 2015.