

Indicadores de desempenho de pavimentos em sistemas de gestão de ativos para os países em vias de desenvolvimento

Pavement performance indicators for asset management systems in developing countries


[10.29073/rae.v3i1.930](https://doi.org/10.29073/rae.v3i1.930)


Recebido: 23 de julho de 2024.

Aprovado: 10 de janeiro de 2025.

Publicado: 3 de fevereiro de 2025.

Autor/a 1: José Vaz , Universidade NOVA de Lisboa, Portugal, jc.vaz@campus.fct.unl.pt.

Autor/a 2: Simona Fontul , Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal, simona@lnec.pt.

Autor/a 3: Paula Couto , Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal, pcouto@lnec.pt.

Resumo

As organizações rodoviárias necessitam de avaliar, com precisão, as condições dos pavimentos para tomarem as decisões mais adequadas de manutenção. A utilização de um grande número de parâmetros técnicos e indicadores de desempenho na avaliação do estado dos pavimentos, permite uma definição mais precisa na intervenção de manutenção / reabilitação. Por isso, a seleção e utilização destes fatores desempenham um papel fundamental no processo de gestão de pavimentos. Entretanto, a recolha de dados obtidos exclusivamente por meio do processo de monitorização dos pavimentos é uma das etapas mais dispendiosas na gestão desses ativos.

O principal objetivo deste trabalho é identificar os indicadores de desempenho em sistemas de gestão de ativos para os países em vias de desenvolvimento. A metodologia passa pela escolha dos parâmetros técnicos utilizados na avaliação do seu desempenho funcional e estrutural, incluindo o processamento de dados de monitorização, normalmente recolhidos com recurso a equipamentos, dos mais simples aos mais sofisticados, com diferentes potencialidades e limitações.

Pretende-se, ainda, contribuir para a identificação de técnicas alternativas, que possam ser aplicadas nos países em vias de desenvolvimento, na avaliação das condições dos pavimentos rodoviários. Nesses países, com a escassez de equipamentos de ensaio e a falta de campanhas para a avaliação, os pavimentos não são sujeitos a medidas atempadas e adequadas de manutenção e acabam por ter um ciclo de vida bastante reduzido.

Palavras-Chave: Gestão de Ativos; Indicadores de Desempenho; Monitorização de Pavimentos.

Abstract

Road organisations need to accurately assess the condition of pavements to make the most appropriate maintenance decisions. The use of many technical parameters and performance indicators in the assessment of pavement condition allows for a more precise definition of the maintenance / rehabilitation intervention. Therefore, the selection and use of these factors plays a fundamental role in the pavement management process. However, collecting monitoring data is one of the most expensive stages in the management of these assets.

The main objective of this work is to identify performance indicators for asset management systems in developing countries. The methodology involves choosing the technical parameters used to assess their functional and structural performance, including the processing of monitoring data, usually acquired using equipment, from the simplest to the most sophisticated, with different potential and limitations.

The aim is also to help identify alternative techniques that can be applied, in developing countries, to assess the condition of road pavements. In these countries, with the scarcity of testing equipment and the lack of evaluation campaigns, pavements are not subject to timely and adequate maintenance actions and, consequently, have a shorter life cycle.

Keywords: Asset Management; Pavement Monitoring; Performance Indicators.

1. Introdução

O conceito de Gestão de Ativos (GA) surgiu no início dos anos 90 no Reino Unido, na sequência da evolução da indústria e da implementação de processos de otimização dos ativos, por forma a não representarem risco para as organizações no que toca à sua funcionalidade e sustentabilidade. A GA é um processo que envolve o equilíbrio entre diversas variáveis, como custos, riscos, oportunidades, benefícios de desempenho, etc., visando a otimização de recursos. Neste sentido, existe um conjunto de práticas que devem ser seguidas pelas organizações que permitem inventariar, registar e avaliar os ativos tangíveis (Santos, 2018).

Assim, surge a série de Normas Internacionais ISO 55000 que define os princípios, orientações e requisitos, que permitem garantir o bom desempenho da GA de uma organização. A ISO 55000:2014 oferece uma visão abrangente de como gerir ativos e implementar sistemas de gestão, a ISO 55001:2014 estabelece os requisitos para um sistema de gestão de ativos, enquanto a ISO 55002:2018 pormenoriza os requisitos técnicos específicos para setores, ativos ou atividades.

A GA visa otimizar o valor dos ativos e envolve a tomada de decisões estratégicas sobre aquisição, utilização, manutenção / reabilitação ou eliminação dos ativos para garantir que os mesmos contribuem positivamente para os objetivos da organização. Assim, procura maximizar o retorno do investimento efetuado, reduzir os custos operacionais e prolongar a vida útil dos ativos (Hastings, 2015). A GA assegura o alcance dos objetivos da organização por meio de uma gestão eficaz e eficiente dos seus ativos, de forma consistente e sustentável ao longo do tempo. Os quatro princípios fundamentais da gestão de ativos são: Valor, Alinhamento, Liderança e Garantia, devendo ser orientados para todo o ciclo de vida dos ativos na tomada de decisões (IAM, 2015).

Os pavimentos rodoviários, deterioram-se devido à solicitação do tráfego, à exposição às ações climáticas, e à falta de manutenção. Como resultado, a sustentabilidade dessas infraestruturas torna-se uma preocupação central (Uddin et al., 2013), dado que os gastos com a manutenção representam uma parcela significativa dos orçamentos destinados às infraestruturas, evidenciando a importância de investimentos contínuos nessa área.

A prática eficaz de gestão das infraestruturas é fundamentada na avaliação de desempenho, para definir parâmetros de referência, de modo a determinar quais as melhorias que devem ser priorizadas num dado momento. O cumprimento dos objetivos e critérios de desempenho pode ser medido por meio de índices específicos que caracterizam as infraestruturas, designados por indicadores de desempenho (Hastings, 2015).

No sentido de ajudar na tomada de decisão, relativamente às intervenções, as administrações rodoviárias podem utilizar diversos tipos de indicadores de desempenho, como: económicos, sociais, ambientais e de serviço (Deluka-Tibljajš et al., 2013). A análise das características dos pavimentos baseia-se exclusivamente nos indicadores de desempenho de serviço, denominados de indicadores funcionais e estruturais. Os indicadores funcionais têm por finalidade avaliar a segurança, o conforto e a economia, enquanto os indicadores estruturais avaliam a capacidade de carga dos pavimentos. Esses dois tipos de indicadores (funcionais e estruturais) são essenciais para avaliar o estado geral do pavimento, e a conjugação da informação obtida permite uma descrição eficiente das condições do pavimento, facilitando na definição de intervenções de manutenção e reabilitação.

Este trabalho tem como objetivo contribuir para identificação de indicadores de desempenho e de técnicas de monitorização alternativas para a avaliação de pavimentos em países em desenvolvimento. Nessas regiões, a escassez de equipamentos e a ausência de campanhas regulares de monitorização resultam numa manutenção insuficiente, comprometendo a durabilidade dos pavimentos e reduzindo significativamente o seu ciclo de vida.

2. Gestão de Ativos em Infraestruturas de Transporte

2.1. Sistema de Gestão de Ativos

Um Sistema de Gestão de Ativos (SGA) planeia e controla as atividades relacionadas com os ativos durante todo o seu ciclo de vida, para garantir que o seu desempenho vai ao encontro das estratégias competitivas pretendidas

pela organização (El-Akruti & Dwight, 2010). Segundo a Norma Portuguesa NP ISO 55000:2016, o SGA é composto por ferramentas e elementos inter-relacionados que sustentam a GA. O ativo é definido como sendo “um bem, uma coisa ou uma entidade, que tem um valor potencial ou real para uma organização”. Este valor do ativo pode variar de acordo com a organização em questão e as partes interessadas, podendo ser tangível ou intangível, financeiro ou não financeiro.

2.2. Planeamento de Gestão de Ativos

A GA de qualquer organização abrange uma ampla área, que pode ir desde a identificação das expectativas dos clientes, até às operações rotineiras pré-definidas como um objetivo de serviço a ser atingido (IIMM, 2006). Assim, o planeamento é fundamental na gestão dos ativos das organizações e deve ser feito a três níveis: Estratégico, Tático e Operacional (Alegre & Covas, 2010).

O Plano Estratégico (longo prazo) da organização é definido pela sua administração e corresponde ao ponto de partida para o desenvolvimento da política, estratégia, objetivos e planos de gestão de ativos, que direcionam a combinação ideal de atividades do ciclo de vida, a serem aplicadas em todo o portfólio. O Plano Tático (médio prazo) define as opções de intervenção a serem implementadas e as suas prioridades temporais, nas quais os recursos financeiros, físicos e humanos disponíveis são distribuídos por cada departamento, visando alcançar níveis de serviço ou objetivos gerais. O Plano Operacional (curto prazo) identifica as ações imediatas a serem implementadas por cada unidade operativa, definindo os locais exatos e a cronologia de intervenção, bem como as tecnologias e os recursos a serem usados, e deve incluir um sistema de avaliação e desempenho internos.

2.3. SGA de Infraestruturas de Transporte

Um SGA de infraestruturas de transporte é constituído por conjuntos organizados de processos, tecnologias e estratégias, utilizados para gerir e otimizar as redes de transporte. Estes sistemas visam melhorar a eficiência, segurança e sustentabilidade das infraestruturas, envolvendo planeamento, monitorização e manutenção / reabilitação, de modo a responder às necessidades de mobilidade de pessoas e mercadorias e a promover o desenvolvimento económico. Avaliar e comunicar o desempenho dos ativos que se encontram sob a sua gestão é uma responsabilidade vital e amplamente aceite pelas organizações, conforme estabelecido na ISO 55001:2014. As entidades gestoras das infraestruturas de transportes partilham dessa responsabilidade, já que a avaliação do desempenho dos seus ativos auxilia em diferentes processos, como por exemplo, na análise de falhas e não conformidades, na análise de mecanismos de degradação, na garantia do cumprimento dos níveis de serviço estabelecidos e na identificação das necessidades de intervenção e sua priorização.

Salienta-se que, existe uma influência significativa e de longa data, inclusive ao nível da normalização, na área das infraestruturas rodoviárias, entre Portugal e os países em vias de desenvolvimento dos PALOP (Países Africanos de Língua Oficial Portuguesa), no que se refere a: traçado dos pavimentos, dimensionamento dos mesmos, formulação das misturas betuminosas, classificação das patologias e níveis de severidade, desenvolvimento de cadernos de encargos, etc. Assim, optou-se por escolher como exemplo o SGA da Infraestruturas de Portugal (IP), a fim de ser adaptado às condições dos países em vias de desenvolvimento.

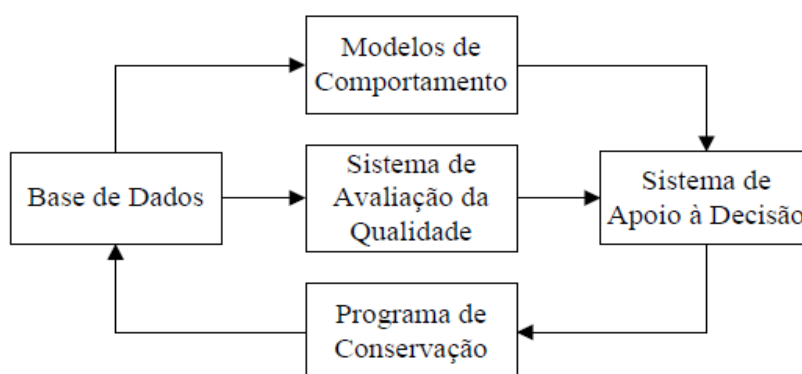
A IP é responsável por um vasto portfólio de ativos, onde se incluem infraestruturas rodoviárias e ferroviárias, que constitui um desafio significativo ao nível da sua gestão integrada e harmonizada. Nas infraestruturas rodoviárias consideram-se os seguintes grupos de ativos: Estruturas de Contenção, Pavimentos Rodoviários, Obras de Arte, Equipamentos de Sinalização e Segurança, entre outros (Morgado et al., 2022). Relativamente aos pavimentos rodoviários, existe o Sistema de Gestão de Pavimentos (SGP), cujo desenvolvimento ocorreu entre 2003 e 2007. Desde 2007, as inspeções principais em toda a rede de pavimentos são realizadas anualmente, com recursos humanos e de equipamentos da IP (Morgado et al., 2022). A metodologia de avaliação utiliza um Índice de Qualidade para descrever o estado do pavimento num determinado trecho, com base nos parâmetros obtidos na sua monitorização (Picado-Santos & Ferreira, 2008). Este sistema dispõe de modelos de previsão do comportamento dos pavimentos, que ajudam na identificação das necessidades de intervenção.

3. Gestão de Pavimentos Rodoviários

3.1. Sistema de Gestão de Pavimentos

O SGP é um conjunto coordenado de atividades, integrado com planejamento, construção, manutenção, avaliação e pesquisa, associado a uma base de dados, com o objetivo de otimizar os recursos disponíveis, para estabelecer programas de manutenção / reabilitação. O SGP é constituído por uma Base de Dados Rodoviários (BDR); um Sistema de Avaliação da Qualidade dos pavimentos (SAQ) e um Sistema de Apoio à Decisão (SAD), como se ilustra na Figura 1 (Picado-Santos & Ferreira, 2008).

Figura 1: Estrutura de um Sistema de Gestão de Pavimentos.



Fonte: (Picado-Santos & Ferreira, 2008).

3.2. Base de Dados Rodoviários

A BDR é o ponto de partida principal e a sua fiabilidade condiciona todo o SGP, sendo uma ferramenta imprescindível. A base é configurada segundo as políticas de administração das rodovias, quer seja ao nível da rede ou do projeto, para responder às necessidades específicas relacionadas com a avaliação da qualidade dos pavimentos e a aplicação da ferramenta de apoio à decisão. Na BDR deve estar contida informação relevante sobre os pavimentos, como a geometria do perfil transversal, o histórico dos pavimentos, o tráfego, o tipo de intervenções de manutenção e os respetivos custos, e ainda informação complementar relacionada com a utilização dos modelos de previsão da evolução da degradação nos pavimentos (Picado-Santos & Ferreira, 2008).

3.3. Monitorização e Exigências dos Pavimentos

A monitorização é essencial para o planeamento da manutenção e reabilitação dos pavimentos, incluindo a monitorização e o processamento dos dados recolhidos, para identificar a necessidade de intervir e a forma de o fazer. A monitorização consiste em três vertentes principais: a inspeção visual, a caracterização funcional e a caracterização estrutural (Pereira & Miranda, 1999; Fontul, 2004; Branco et al., 2011).

A inspeção das degradações pode ser obtida a partir de três tipos de técnicas: Manual, Semiautomática e Automática. Na inspeção visual manual, o operador desloca-se a pé, ao longo do trecho, e regista as degradações observadas segundo o catálogo de patologias numa ficha de inspeção visual (Fontul, 2021). Na técnica semiautomática, o levantamento é feito por inspeção direta, por meio de um veículo, onde os registos dos resultados são feitos em suporte magnético ou em fichas de inspeção. Na técnica automática, o levantamento é feito através de filmagem vídeo, sendo o tratamento dos dados feito manualmente ou automaticamente. Na última década regista-se um desenvolvimento significativo de metodologias avançadas nesta área, tais como: Laser LiDAR (*Light Detection and Ranging*) ou filmagens com recurso a Drone (Solla et al., 2021; Fontul et al., 2023).

A avaliação das características funcionais dos pavimentos tem por objetivo definir a qualidade global do pavimento, nomeadamente ao nível do conforto, economia e segurança (Pereira & Miranda, 1999). Os principais parâmetros avaliados e os respetivos métodos de ensaio geralmente utilizados (Branco et al., 2011; Fontul, 2021), são os seguintes: «



- Irregularidade longitudinal, avaliada com Perfilómetro Laser ou Perfilómetro Inercial;
- Irregularidade transversal, avaliada com Perfilómetro Laser ou Régua (de 3 m);
- Coeficiente de atrito, avaliado com: Pendulo Britânico (atrito pontual); *GripTester* (atrito longitudinal); e *Side-way force Coefficient Routine Investigation Machine* (SCRIM) ou Mu-Meter (atrito transversal);
- Profundidade de textura, avaliada com Perfilómetro Laser ou método de Mancha de Areia.

As exigências funcionais da camada de desgaste, estão vinculadas à segurança, conforto, economia e ambiente, que afetam diretamente os utentes da rodovia, conforme indicado na Tabela 1 (Fontul, 2021).

Tabela 1: Exigências funcionais da camada de desgaste.

Características Superficiais	Segurança	Conforto	Economia	Ambiente
Regularidade Longitudinal	XX	XXXX	XXX	XX
Regularidade Transversal	XXX	XX	X	
Resistência ao Rolamento			XX	
Ruído Pneu / Pavimento		XXX		XXXX
Propriedades Refletoras	XX	XX	XX	
Aderência	XXXX		XX	X

Fonte: (Fontul, 2021).

Os principais objetivos da avaliação estrutural dos pavimentos recaem nos seguintes aspetos: identificação de zonas com comportamentos estruturais distintos, avaliação da capacidade de carga, e dimensionamento do reforço do pavimento, se necessário (Fontul et al., 2023). A avaliação estrutural pode ser feita através de métodos não destrutivos, sendo os equipamentos geralmente usados listados de seguida:

- Equipamentos de carga rolante: *Viga Benkelman*, *Deflectógrafo Lacroix*, *Curviâmetro*, *Traffic Speed Deflectometer* em que a carga é induzida pela passagem de um veículo pesado e as deflexões são medidas num ponto fixo ou em vários pontos da superfície;
- Equipamentos de carga estacionaria estática: ensaios de carga com placa;
- Equipamentos de carga estacionaria dinâmica: Defletómetro de Impacto (*Falling Weight Deflectometer*), sendo este o equipamento mais usado nos países desenvolvidos.

3.4. Avaliação da Qualidade dos Pavimentos

A avaliação da condição do pavimento é uma etapa essencial na sua gestão, uma vez que as estratégias eficazes de manutenção e reabilitação dependem de avaliações precisas e indicação da decisão a tomar (Uddin et al., 2013). Esta avaliação consiste em descrever as suas condições técnicas, considerando características físicas como deformação, rugosidade, atrito e estado estrutural. Segundo Marcelino et al. (2018), diversos indicadores são utilizados na tomada de decisões sobre intervenções em pavimentos, sendo os mais populares: o Índice de Condição do Pavimento (*Pavement Condition Index — PCI*), o Índice de Serviço do Pavimento (*Pavement Serviceability Index — PSI*) da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) e o Índice de Qualidade do Pavimento (IQP) da IP.

Neste trabalho serão abordados o IQP e os Indicadores de Desempenho da Ação COST 354, uma vez que são indicadores para a avaliação do estado do pavimento de particular interesse para os PALOP. A expressão usada para o IQP em Portugal é dada pela Equação (1), com os coeficientes adaptados a Portugal, a partir do IPQ aplicado no Estado do Nevada dos Estados Unidos da América (Picado-Santos & Ferreira, 2008).

$$IQP_t = 5 * e^{-0.0002598 * \frac{IRI_t}{2}} - 0.002139 * R_t^2 - 0.03 * (C_t + S_t + P_t)^{0.5} \quad (1)$$



IQP_t = Índice de Qualidade do Pavimento no ano t ; IRI_t = irregularidade longitudinal do pavimento (*International Roughness Index* — IRI) no ano t (mm/km); R_t = profundidade média das rodeiras no ano t (mm); C_t = área com fendilhamento no ano t ($m^2/100m^2$); S_t = área com degradação superficial de materiais (covas e peladas) no ano t ($m^2/100m^2$); P_t = área com reparações no ano t ($m^2/100m^2$).

O IQP_t pode variar entre 0 (pior estado) e 5 (melhor estado), considerando-se que as secções do pavimento: com IQP_t inferior a 1,5 estão em "Mau" estado e necessitam de intervenção; com IQP_t entre 1,5 e 2,5 estão em "Mau" estado; com IQP_t entre 2,5 e 3,5 estão em "Razoável" estado; e com IQP_t superior a 3,5 estão em "Bom" estado (Horta et al., 2013). Este índice pode fazer uma avaliação geral do estado da rede, permitindo a identificação de segmentos rodoviários em que as intervenções de manutenção / reabilitação são necessárias.

3.5. Indicadores de Desempenho dos Pavimentos

No âmbito da Ação COST 354 (Litzka et al., 2008), o Indicador de Desempenho (*Performance Indicator* — PI) é uma representação do estado de um pavimento, podendo ser expresso através de um parâmetro técnico dimensional ou através de um índice adimensional. Um parâmetro técnico é uma característica física do estado do pavimento, obtida através de medições ou outros métodos, enquanto um índice de desempenho é um número adimensional obtido a partir do parâmetro técnico, utilizando uma função de transferência.

Os Indicadores de Desempenho Individuais (*Individual Performance Indicator* — IPI) representam um único parâmetro técnico e podem ser combinados para formar PI Pré-Combinados e Combinados (PCPI e CPI), representando o desempenho funcional e estrutural de um pavimento. Um PI é "pré-combinado" se estiver relacionado com duas ou mais características físicas semelhantes (por exemplo, "fendilhação isolada" e "fendilhação pele de crocodilo"), e é "combinado" se estiver relacionado com duas ou mais características físicas diferentes, isto é, não semelhantes. Na combinação dos PCPI e dos CPI obtém-se os PI Globais ou Gerais (GPI) (Litzka et al., 2008).

A Ação COST 354 define os IPI: Irregularidade longitudinal (**IRI-PI_E**), Irregularidade transversal (**RD-PI_R**), Macrotextura ou textura superficial (**MPD-PI_T**), Atrito ou microtextura (**SFC-PI_F**) e Capacidade de carga (**PI_B**); os PCPI: Fendilhamento (**PI_{CR}**) e Defeito da superfície (**PI_{SB}**); e os CPI: Conforto, Segurança e Condição estrutural (Litzka et al., 2008).

3.5.1. Indicadores de Desempenho Individuais

Os IPI vinculados às exigências funcionais, propostos para descreverem o estado dos pavimentos da IP, são apresentadas na Tabela 2, onde estão referenciados os parâmetros técnicos, o nome do indicador e respetiva unidade, bem como as funções de transferência da Ação COST 354 (Litzka et al., 2008; Marcelino et al., 2018). No âmbito desta ação: cada parâmetro técnico possui um indicador de desempenho correspondente; o desenvolvimento das funções de transformação é essencial, para criar um procedimento aplicável a uma grande diversidade de utilizadores; a seleção do indicador de desempenho mais adequado, para um parâmetro técnico específico, é feita de acordo com um conjunto de critérios definidos pelos peritos.

Tabela 2: Indicadores de desempenho individuais funcionais.

Parâmetro Técnico	Indicador e Unidade	Função de Transferência
Irregularidade Longitudinal	IRI (mm/m)	$PI_E = \text{Max} (0 ; \text{Min} (5 ; 0,1733 \times IRI^2 + 0,7142 \times IRI - 0,0316))$
Irregularidade Transversal	RD (mm)	$PI_R = (-0,0015 \times RD^2) + 0,2291 \times RD$ [se $RD < 26,4\text{mm}$] $PI_R = 5$ [se $RD \geq 26,4\text{mm}$]
Textura Superficial	MPD (mm)	$PI_T = 6,6 - 5,3 \times MPD$
Resistência à Derrapagem (Atrito)	SFC (0 a 1) a 60 km/h	$PI_F = \text{Max} (0; \text{Min} (5; - 17,6 \times SFC + 11,205))$

Fonte: (Litzka et al., 2008; Marcelino et al., 2018).



As funções de transferência têm a finalidade de transformar os parâmetros técnicos em indicadores de desempenho adimensionais, os quais avaliam os parâmetros técnicos numa escala de 0 (melhor estado) a 5 (pior estado), como é ilustrado Tabela 3.

Tabela 3: Avaliação dos indicadores de desempenho individuais funcionais.

Indicador e Unidade	Avaliação e Valor dos: (PI _E), (PI _R), (PI _T), (PI _F)				
	Muito Bom (0-1)	Bom (1-2)	Médio (2-3)	Pobre (3-4)	Muito Pobre (4-5)
IRI (mm/m)	0 - 1,1	1,1 - 1,9	1,9 - 2,6	2,6 - 3,2	3,2 - 3,7
RD (mm)	0 - 4,7	4,7 - 9,9	9,9 - 15,5	15,5 - 21,8	21,8 - 29,0
MPD (mm)	1,25 - 1,06	1,06 - 0,87	0,87 - 0,68	0,68 - 0,49	0,49 - 0,30
SFC (0 a 1) a 60 km/h	0,64 - 0,58	0,58 - 0,52	0,52 - 0,47	0,47 - 0,41	0,41 - 0,35

Fonte: (Litzka et al., 2008).

Os IPI estruturais, propostos para serem considerados, são o Índice de Curvatura Superficial (SCI_{300}), ou a Relação entre Vida Residual e Vida de Projeto (R/D), dependendo da disponibilidade de dados (Litzka et al., 2008; Marcelino et al., 2018), conforme apresentado na Tabela 4 e avaliado de acordo com a Tabela 5.

Tabela 4: Indicadores de desempenho individuais estruturais.

Parâmetro Técnico	Indicador e Unidade	Função de Transferência
Condição Estrutural	SCI_{300} (μm)	$PI_B = SCI_{300} / 129$
	R/D	$PI_B = \text{Max} (0; \text{Min} (5; 5 \times (1-R/D)))$

Fonte: (Litzka et al., 2008; Marcelino et al., 2018).

O valor do SCI_{300} é calculado como a diferença normalizada entre as deflexões d_0 e d_{300} , obtidas em ensaios de carga com Defletômetro de Impacto, com uma força de impacto de 65 kN. Na ausência de defletômetro de impacto, a deflexão pode ser obtida a partir do ensaio de carga com Viga *Benkleman*. A Vida Residual pode ser calculada utilizando a Equação (2), sendo definida como o número de passagens de um eixo de referência, necessário para que um pavimento atinja o estado de ruína, num determinado momento da sua vida útil. Este cálculo em cada momento é influenciado pelo tráfego passado e pelo critério de ruína (Freitas & Pereira, 2001).

$$R = N_a - N_p \tag{2}$$

R = vida residual; N_a = número admissível de passagens correspondente ao critério de dimensionamento condicionante; N_p = número de passagens correspondentes ao tráfego passado.

Tabela 5: Avaliação dos indicadores de desempenho individuais estruturais.

Indicador e Unidade	Avaliação e valor do (PI _B)				
	Muito Bom (0-1)	Bom (1-2)	Médio (2-3)	Pobre (3-4)	Muito Pobre (4-5)
SCI_{300} (μm)	0 - 129	129 - 258	258 - 387	387 - 516	516 - 645
R/D	1,0 - 0,8	0,8 - 0,6	0,6 - 0,4	0,4 - 0,2	0,2 - 0,0

Fonte: (Litzka et al., 2008; Marcelino et al., 2018).



3.5.2. Indicadores de Desempenho Pré-Combinados

Os parâmetros técnicos Fendilhamento e Defeito da superfície são divididos em subcategorias, por isso a Ação COST 354 definiu PCPI que conjugam as respectivas subcategorias num valor único para cada tipo. Assim, estes parâmetros são calculados como a soma ponderada de diferentes tipos e dimensões de fendilhamento e de defeitos da superfície, em relação à área de referência, resultando numa taxa de fendilhamento (*cracking rate* – CR) e em defeitos da superfície (*surface defects* – SD) (Marcelino et al., 2018). Na Tabela 6 apresentam-se os dois parâmetros técnicos, o nome e respetiva unidade dos indicadores, bem como as funções de transferência.

Tabela 6: Indicadores de desempenho pré-combinados.

Parâmetro Técnico	Indicador e Unidade	Função de Transferência
Fendilhamento	Taxa de Fendas (%)	$PI_{CR} = \text{Max} (0; \text{Min} (5; 0,16 \times CR))$
Defeito da Superfície	PI_{SD} (%)	$PI_{SD} = \text{Max} (0; \text{Min} (5; 0,1333 \times SD))$

Fonte: (Litzka et al., 2008; Marcelino et al., 2018).

No caso do fendilhamento, os diferentes tipos de fendas (linear, ramificada, pele de crocodilo, etc.) são combinados de modo a obter o parâmetro de fendilhamento (TP_{CR}), e o mesmo acontece no caso do defeito da superfície (TP_{SD}), de acordo com o expresso nas Equações 3 a 6.

$$TP_i = \min (100; TP_{i,L}; TP_{i,A}; TP_{i,E}) \quad (3)$$

$$TP_{i,L} = \min (100; \frac{1}{A_{ref}} * \sum_n \left[W_n * I_l * \sum_i (S_i * L_i) \right] * 100) \quad (4)$$

$$TP_{i,A} = \min (100; \frac{1}{A_{ref}} * \sum_m \left[W_m * I_l * \sum_i (S_i * A_i) \right] * 100) \quad (5)$$

$$TP_{i,E} = \min (100; \frac{1}{A_{ref}} * \sum_0 \left[W_0 * I_A * \sum_i (S_i * E_i) \right] * 100) \quad (6)$$

$TP_{i,L}$ = taxa de comprimento de degradação (%); $TP_{i,A}$ = taxa de área de degradação (%); $TP_{i,E}$ = taxa de elemento de degradação (%); A_{ref} = área de referência; W_m = peso da área de degradação; S_i = nível de severidade de degradação tipo i ; A_i = área de degradação tipo i ; W_n = peso do comprimento de degradação; I_l = largura de influência padrão de fendas lineares (0,5 m); L_i = comprimento de degradação tipo i ; W_0 = peso de elemento de degradação; I_A = área padrão de elementos com degradação; E_i = número de elementos com degradação tipo i .

3.5.3. Indicadores de Desempenho Combinados

Os CPI são calculados considerando os indicadores de segurança, de conforto e de condição estrutural, podendo ainda ser incorporados indicadores ambientais. Estes índices são determinados usando a Equação 7.

$$CPI = \min (5; I_1 + \frac{P}{100} * \mu (I_2, I_3; \dots \dots \dots, I_n)) \quad (7)$$

CPI = indicador de desempenho combinado; I_1 = máximo ponderado de indicador de desempenho individual (IPI); P = fator de influência que controla a influência total dos IPI (%); $\mu (I_2, I_3, I_4, \dots, I_n)$ = valor médio ponderado dos restantes IPI.

Cada CPI é obtido da combinação de diferentes IPI nos seguintes três níveis de aplicação específicos: mínimo, padrão e ótimo, conforme ilustrado na Tabela 7.



Tabela 7: Parâmetro de entrada para indicadores de desempenho combinados.

Indicadores	Nível		
	Mínimo	Padrão	Ótimo
Conforto	PI _E	PI _E , PI _R , PI _{SD}	PI _E , PI _R , PI _T , PI _{CR} , PI _{SD}
Segurança	PI _F	PI _F , PI _R , PI _T	PI _F , PI _R , PI _T , PI _{SD, cat1} *, PI _{SD, cat2} *
Estrutural	PI _B	PI _B , PI _{CR}	PI _B , PI _{CR} , PI _E , PI _R
Ambiental			PI _E ou pa, PI _T ou r, PI _{SD, cat2}

*apenas exsudação; pa — poluição do ar; r — ruído

Fonte: (Litzka et al., 2008; Marcelino et al., 2018).

A Ação COST 354 propõe um conjunto de ponderações para a avaliação de cada CPI, que indica o grau de importância de cada parâmetro técnico, sendo 0 de importância nula e 1 de importância máxima, como indicado na Tabela 8, e recomenda um fator de influência (P) com uma variação entre 10 e 20 (ver Equação 7).

Tabela 8: Ponderações dos indicadores de desempenho combinados no nível ótimo.

Parâmetro Técnico	Conforto	Segurança	Estrutural
Irregularidade Longitudinal (PI _E)	1,0	0,0	0,6
Irregularidade Transversal (PI _R)	0,7	0,9	0,5
Textura Superficial (PI _T)	0,4	0,6	0,0
Resistência a Derrapagem (PI _F)	0,0	0,9	0,0
Condição Estrutural (PI _B)	0,0	0,0	1,0
Fendilhamento (PI _{CR})	0,5	0,0	0,9
Defeitos de Superfície (PI _{SD})	0,6	0,6	0,0

Fonte: (Litzka et al., 2008; Marcelino et al., 2018).

3.5.4 Indicadores de Desempenho Geral

O GPI avalia a condição global dos pavimentos e pode ser usado para analisar futuras estratégias de Manutenção / Reabilitação. O cálculo do GPI segue uma abordagem semelhante ao CPI, conforme descrito pela Equação 8.

$$GPI = \min \left(5; I_1 + \frac{P}{100} * \mu * (I_2, I_3 \dots \dots \dots, I_n) \right) \quad (8)$$

GPI = indicador de desempenho global ou geral; I₁ = máximo ponderado de indicador de desempenho combinado (CPI); P = fator de influência que controla a influência total dos CPI; μ (I₂, I₃, I₄, ..., I_n) é o valor médio ponderado dos restantes CPI

Na Tabela 9 são apresentadas as ponderações dos GPI para cada categoria de rodovia (autoestrada, estrada principal, estrada secundária e outras). Recomenda-se que estes valores de ponderação, propostos pela Ação COST 354, sejam avaliados relativamente à sua plausibilidade, conforme o contexto de utilização, os objetivos e as demais condições prévias, antes de serem aplicados.

Tabela 9: Ponderações dos GPI ao nível ótimo.

GPI	Autoestrada	Estrada Principal	Estrada Secundária e Outras
Conforto	1,00	1,00	1,00
Segurança	0,70	0,70	0,65
Estrutural	0,65	0,80	1,00
Ambiental	0,25	0,30	0,35

Fonte: (Litzka et al., 2008; Marcelino et al., 2018).



4. Aplicação em Países em Vias de Desenvolvimento

No âmbito do trabalho desenvolvido, e no que diz respeito à inspeção visual, concluiu-se que a técnica semiautomática ou automática seria a ideal para ser implementada nos Países em Vias de Desenvolvimento (PVD), uma vez que fornece resultados credíveis e a um baixo custo.

Na avaliação das características funcionais, é de salientar que as alternativas aos meios de ensaios automáticos, que recorrem a equipamentos dispendiosos, passam pela utilização de: Pendulo Britânico na avaliação do atrito, Régua (de 3 m) na avaliação da irregularidade transversal, e Mancha de Areia na avaliação de textura superficial. Na ausência de equipamento, dedicado, com recurso a laser para medição do IRI, este poderá ser calculado com base nos resultados da inspeção visual, no caso dos pavimentos flexíveis, a partir da Equação 9, e estimado de acordo com os critérios apresentados na Tabela 10.

$$IRI = \frac{\text{Nível} * \text{Comprimento afetado}}{\text{Comprimento total do troço em estudo}} \quad (9)$$

IRI = irregularidade longitudinal; Nível = Nivel de gravidade das patologias existentes (Nível 1, Nível 2 e Nível 3); Comprimento afetado = comprimento que é afetado por cada nivel de gravidade; Comprimento total do troço em estudo = comprimento total do troço em estudo.

Tabela 10: Valores para o cálculo do IRI.

Degradação	Intervalo	Condição	Nível	IRI
Fendilhamento, Rodeiras, Peladas, etc.	≤1,25	≤	1	Tipo 1 IRI = 1500mm/km
		≤	1	
		≤	1	
Fendilhamento, Rodeiras, Peladas, etc.	>1,25 e <2,25			Tipo 2 IRI = 2500mm/km
Fendilhamento, Rodeiras, Peladas, etc.	≥2,25	=	3	Tipo 3 IRI = 3500mm/km
		=	3	
		≥	2	

Fonte: Adaptado de (Picado-Santos, 2011).

No caso da avaliação da capacidade de carga, a técnica do ensaio de carga com placa é considerada a alternativa mais adequada, pois é a mais simples e mais económica em relação às demais, mesmos sendo mais morosa. Salienta-se, ainda, que é possível obter uma indicação da capacidade estrutural do pavimento a partir do conhecimento do *California Bearing Ratio* (CBR) do solo de fundação (conhecendo o CBR estima-se o modulo de elasticidade).

O método de avaliação apresentado pela Ação COST 354 proporciona uma análise mais profunda na avaliação da qualidade dos pavimentos, uma vez que engloba vários indicadores de desempenho, sendo considerado o mais indicado. Na Tabela 11 apresenta-se a correlação entre os indicadores de desempenho descritos e a monitorização. Nesta tabela são mencionados os equipamentos de alta resolução usados para a monitorização e as alternativas que podem ser aplicadas nos países em via de desenvolvimento. Contudo, é de salientar que, independentemente de existirem técnicas alternativas para monitorização, não se pode descurar o investimento em equipamentos mais modernos e expeditos para tal efeito, uma vez que, para além de fornecer resultados imediatos, contribui também para a segurança dos técnicos que efetuam o levantamento das degradações existentes nas rodovias em avaliação.



Tabela 11: Correlação entre indicadores e monitorização de pavimentos.

	Indicador	Equipamentos	Alternativas PVD	Indicadores									
				IQP	PSI _{est}	PI _E	PI _R	PI _T	PI _F	PI _{CR}	PI _{SD}	PI _B	
Monitorização de Pavimento	IRI	Laser	Inspeção Visual	√		√							
	Rodeiras	Laser	Inspeção Visual Régua de 3m	√									
	Textura	Laser	Mancha de Areia					√					
	Atrito	Grip-Tester	Pendulo Britânico						√				
	Fendilhamento	Videografia, LiDAR	Inspeção Visual	√			√			√			
	Reparações	Videografia, LiDAR	Inspeção Visual	√									
	Degradações Superficiais	Videografia, LiDAR	Inspeção Visual	√								√	
	Deflexões/ Capacidade de Suporte	FWD, TSD	Ensaio de Carga com Placa			√							√
	Espessuras das Camadas	GPR	Carotes, Poços			√							
	CBR	Laboratório				√							

Fonte: Adaptado de (Brito, 2021).

5. Conclusão

Este estudo teve como objetivo analisar indicadores de desempenho e técnicas alternativas de monitorização de pavimentos, a ser aplicadas nos países em vias de desenvolvimento, tendo em consideração que a inspeção de pavimentos é essencial para o apoio à tomada de decisão dentro de um sistema de gestão de pavimentos. Assim, apresenta-se uma correlação entre os indicadores de desempenho e a monitorização, especificando as técnicas alternativas a ser implementadas em países em vias de desenvolvimento.

As alternativas apresentadas podem ser consideradas adequadas, dado que se trata da utilização de equipamentos simples, apesar de se tratar de métodos mais morosos e com resultados localizados, mas que apresentam resultados fiáveis na avaliação da qualidade dos pavimentos.

Nos países em vias de desenvolvimento, normalmente, os investimentos são direcionados para outras vertentes, esquecendo que as infraestruturas de transporte são o pilar de desenvolvimento económico de qualquer país. Verificou-se que, com alternativas simples e de baixo custo, é possível contribuir para uma melhor manutenção e reabilitação dos pavimentos rodoviários.

Agradecimentos

Agradece-se o apoio financeiro da FCT — Fundação para a Ciência e Tecnologia, I.P., no âmbito da Bolsa de Doutoramento PRT/BD/151572/2021.

Referências

Alegre, H., & Covas, D. (2010). *Gestão patrimonial de infraestruturas de abastecimento de água: Uma abordagem centrada na reabilitação*. ERSAR, LNEC e IST. ISBN: 978-989-8360-04-5.

Branco, F., Pereira, P., & Santos, L. P. (2011). *Pavimentos rodoviários*. Edições Almedina. ISBN: 9789724026480.

Brito, R. G. (2021). *Gestão de infraestruturas rodoviárias — Importância de monitorização e dos indicadores de desempenho para as tomadas de decisão* [dissertação de mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa].

- Deluka-Tibljša, A., Karleuša, B., & Dragičević, N. (2013). Review of multicriteria-analysis methods application in decision making about transport infrastructure. *Građevinar*.
- El-Akruti, K. O., & Dwight, R. (2010). Research methodologies for engineering asset management. In *ACS PRI Social Science Methodology Conference*. University of Wollongong.
- Fontul, S. (2004). *Structural evaluation of flexible pavements using non-destructive tests* [tese de doutoramento, Universidade de Coimbra]. Repositório Científico da Universidade de Coimbra. <https://hdl.handle.net/10316/15738>
- Fontul, S. (2021). *Infraestruturas rodoviárias e ferroviárias* [apontamentos da disciplina]. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- Fontul, S., Neves, J., & Gomes, S. V. (2023). Monitoring of pavement structural characteristics. In C. Chastre, J. Neves, D. Ribeiro, M. G. Neves, & P. Faria (Eds.), *Advances on testing and experimentation in civil engineering* (pp. 143–156). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-05875-2_8
- Freitas, E., & Pereira, P. (2001). Estado da evolução do desempenho dos pavimentos rodoviários flexíveis. *Revista Engenharia Civil da Universidade do Minho*, (11).
- Hastings, N. A. J. (2015). *Physical asset management: With an introduction to ISO 55000* (2.ª ed.). Springer.
- Horta, C. S., Pereira, F. C., Lopes, S., & Morgado, J. (2013). O sistema de gestão de conservação de pavimentos da Estradas de Portugal, S.A.: Balanço de uma implementação consolidada. In *Proceedings of the 7th Portuguese Road Congress*.
- IAM. (2015). *Asset management — An anatomy* (Vol. 3). The Institute of Asset Management.
- IIMM. (2006). *International infrastructure management manual* (Version 3.0). Association of Local Government Engineering NZ Inc. (INGENIUM).
- Instituto Português da Qualidade. (2016). *NP ISO 55000: Gestão de ativos — Visão geral, princípios e terminologia*.
- International Organization for Standardization. (2014). *ISO 55000: Asset management — Overview, principles and terminology*.
- International Organization for Standardization. (2014). *ISO 55001: Asset management — Management systems — Requirements*.
- International Organization for Standardization. (2018). *ISO 55002: Asset management — Management systems — Guidelines for the application of ISO 55001*.
- Litzka, J., Leben, B., La Torre, F., Weninger, A., Antunes, M. L., Kokot, D., Mladenovic, G., Brittain, S., & Viner, H. (2008). The way forward for pavement performance indicators across Europe. *COST Action 354: Performance Indicators for Road Pavements*. <http://repositorio.lnec.pt:8080/jspui/handle/123456789/17659>
- Marcelino, P., Antunes, M., & Fortunato, E. (2018). Comprehensive performance indicators for road pavement condition assessment. *Structure and Infrastructure Engineering*, 14(11), 1433–1445. <https://doi.org/10.1080/15732479.2018.1446179>
- Morgado, J., Serra, M., Amado, J., & Pinheiro, M. M. (2022). Indicadores de desempenho dos ativos das redes rodo e ferroviárias como ferramenta para a otimização da sua gestão. In *10.º CRP — Congresso Rodoferroviário Português*. LNEC.
- Pereira, P., & Miranda, C. M. V. (1999). *Gestão da conservação dos pavimentos rodoviários*. Tipografia Barbosa & Xavier.



Picado-Santos, L. (2011). *Gestão da conservação de pavimentos de infraestruturas de transportes*. Instituto Superior Técnico, Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura.

Picado-Santos, L., & Ferreira, A. (2008). Contributions to the development of the Portuguese Road Administration's Pavement Management System. In *Proceedings of the 3rd European Pavement and Asset Management Conference* (Paper 1138).

Santos, J. M. (2018). *Aplicação da norma ISO 55000 na gestão de ativos de um empreendimento de ecoturismo* [dissertação de mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto]. Repositório P.PORTO. <http://hdl.handle.net/10400.22/14057>

Solla, M., Pérez-Gracia, V., & Fontul, S. (2021). A review of GPR application on transport infrastructures: Troubleshooting and best practices. *Remote Sensing*, 13(4), 672.

Uddin, W., Hudson, W. R., & Haas, R. (2013). *Public infrastructure asset management* (2.^a ed.). McGraw Hill.

Declaração Ética

Conflito de Interesse: Nada a declarar. **Financiamento:** Bolsa de Doutoramento PRT/BD/151572/2021 da FCT. **Revisão por Pares:** Dupla-cega.



Todo o conteúdo da **RAE — Revista de Ativos de Engenharia** é licenciado sob [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), a menos que especificado de outra forma e em conteúdo recuperado de outras fontes bibliográficas.