

## **IA, GeoBIM e Engenharia de Confiabilidade na Gestão de Ativos Ferroviários**

Leonardo José, João Marcelo e Matheus Loos Brugger

### **Resumo:**

Este estudo propõe um modelo de gestão de ativos fundiários ferroviários baseado em confiabilidade (RCM), manutenção baseada na condição (CBM) e nos requisitos da norma ISO 55001. Por meio de uma abordagem metodológica robusta, foi possível adaptar indicadores de confiabilidade a ativos territoriais, estruturar um painel integrado e validar a proposta com dados reais. Os resultados demonstram ganhos operacionais, regulatórios e estratégicos.

*Palavras-chave:* gestão de ativos; RCM; IA; ferrovias; ISO 55001.

### **Abstract:**

This study proposes a model for managing railway land assets based on ReliabilityCentered Maintenance (RCM), Condition-Based Maintenance (CBM), and ISO 55001 requirements. Through a robust methodological approach, reliability indicators were adapted to territorial assets, an integrated dashboard was designed, and the proposal was validated using real data. The results demonstrate operational, regulatory, and strategic benefits.

*Keywords:* asset management; RCM; IA; railways; ISO 55001.

**Sumário:**

1. Introdução: .....	3
2. Metodologia: .....	5
3. Desenvolvimento e resultados: .....	5
4. Conclusões: .....	8
Referências Bibliográficas:.....	11

## 1. Introdução:

A partir da Resolução da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) nº 5.992/2023, as concessionárias ferroviárias brasileiras passaram a ser legalmente obrigadas a manter sistemas de gestão de ativos que contemplem simultaneamente os ativos operacionais, fundiários e imobiliários. Esta resolução impõe critérios rigorosos de rastreabilidade, funcionalidade e disponibilidade operacional, exigindo ainda a vinculação desses ativos a sistemas informatizados que permitam a tomada de decisão baseada em evidências. Porém, apesar desse avanço regulatório, estudos recentes indicam que boa parte das concessionárias ainda opera com sistemas de gestão fragmentados (Oliveira, 2022), sem integração entre as diferentes naturezas de ativos, e com baixa maturidade na aplicação de metodologias baseadas em risco e ciclo de vida (ANTT, 2023; Yadav et al., 2023). Num estudo de caso conduzido em 2022 sobre a aplicação do Modelo de Excelência da Gestão (MEG-10) em uma empresa ferroviária brasileira (Oliveira 2022), o autor fornece um panorama útil sobre a estrutura organizacional e os desafios da gestão integrada de ativos físicos e financeiros. A gestão integrada de ativos no setor ferroviário é, em geral, pautada por normas da família ISO 55000, publicadas pela primeira vez em 2014, em especial a ISO 55001, *Asset management — Asset management system — Requirements* e pelas diretrizes da *Union Internationale des Chemins de Fer* (UIC), que propõem um modelo de ciclo de vida completo para todos os ativos, combinando visão estratégica, governança e integração de dados. A aplicação desse conceito ao ambiente ferroviário requer a incorporação simultânea dos ativos operacionais (infraestrutura de via, material circulante, sinalização, telecomunicações) e dos ativos fundiários (faixa de domínio, terrenos, edificações e áreas de apoio). A UIC reforça a importância de considerar a ferrovia como um sistema de sistemas, onde o desempenho global depende da interação harmoniosa entre recursos físicos, territoriais e operacionais. Estudos recentes, como o framework performance-driven de Kumari et al. (2024), indicam que a integração de KPIs operacionais e fundiários melhora a capacidade de planejamento, reduz gargalos e aumenta o valor estratégico do patrimônio territorial. Casos práticos, como o da Infraestruturas de Portugal (IP), mostram que a adoção de dashboards unificados e indicadores harmonizados permite otimizar a alocação de recursos e fortalecer a governança. Paralelamente, a incorporação de tecnologias como GIS, BIM, gêmeos digitais e IoT viabiliza a conexão entre dados espaciais e operacionais, criando um modelo de gestão baseado em evidências. Em países como Alemanha, Japão e Austrália, foi observada uma clara correlação entre maturidade em gestão de ativos e desempenho operacional, confiabilidade, segurança e

governança (UIC, 2020; Gao et al., 2022). Ao mesmo tempo, as estratégias de *ReliabilityCentered Maintenance* (RCM) e *Condition-Based Maintenance* (CBM) vêm sendo amplamente discutidas como elementos-chave para uma gestão orientada à confiabilidade. A RCM surgiu como metodologia estruturada para identificar modos de falha e definir políticas de manutenção com base no impacto operacional, na segurança e nos custos. A literatura mostra que ambas as abordagens, embora consolidadas na gestão de ativos operacionais como locomotivas, trilhos e sistemas de sinalização, ainda são pouco exploradas em ativos considerados "não produtivos", como terrenos, taludes, faixas de domínio e edificações de apoio (Nappi, 2014; Lima et al., 2021). Essas infraestruturas territoriais, por sua natureza difusa, não se enquadram facilmente nos modelos clássicos de confiabilidade (como o *Mean Time Between Failures*, MTBF e o *Mean Time To Repair*, MTTR), o que contribui para sua exclusão dos sistemas corporativos de priorização de manutenção, investimento e controle. Contudo, recentes estudos demonstram que eventos recorrentes como deslizamentos de talude, invasões em faixas de domínio, degradação de servidões técnicas e perda de rastreabilidade fundiária estão entre os principais vetores de paralisação da malha, aumento de custos operacionais e conflitos regulatórios (Gao et al., 2022; Lima et al., 2021; ANTT, 2023). Esses ativos, longe de serem elementos passivos, configuram-se como suportes críticos à continuidade da operação ferroviária, sobretudo quando considerados sob o prisma da gestão de risco, desempenho e sustentabilidade (Allita et al., 2024; Oliveira, 2023).

Dado este contexto, o presente trabalho propõe um modelo de *Asset Performance Management* (APM) integrado que unifica a gestão de ativos operacionais, fundiários e imobiliários, fundamentando-se nas diretrizes da ISO 55001 e nas estratégias combinadas de RCM e CBM. Este estudo foi deflagrado pela seguinte questão: *é possível aplicar, de forma integrada e sistemática, as estratégias de RCM e CBM a ativos operacionais, fundiários e imobiliários em ferrovias, conforme as diretrizes da ISO 55001, por meio de tecnologias como Geographic Information System (GIS), Internet of Things (IoT) e gêmeos digitais, de modo a otimizar sua gestão e melhorar o desempenho global do sistema ferroviário brasileiro?* A hipótese é que a aplicação sinérgica (embora as vezes conflitante) de ISO 55001, RCM e CBM aos diferentes tipos de ativos, com suporte de tecnologias digitais e integração aos sistemas de gestão empresarial, permite não apenas a antecipação de falhas e o aumento da confiabilidade, mas também a melhoria da governança, da transparência regulatória e da sustentabilidade territorial. O modelo articula três eixos centrais:

Eixo 1: Adaptação de métricas de confiabilidade a ativos fundiários e imóveis — traduzindo eventos como erosão, ocupação, instabilidade geotécnica e falhas estruturais em parâmetros técnicos comparáveis aos dos ativos operacionais;

Eixo 2: Caracterização tipológica e análise crítica de ativos fundiários com base em sua função operacional, grau de exposição ao risco, dificuldade de controle e impacto na segurança ferroviária. A partir de dados extraídos de relatórios técnicos das concessionárias, informações públicas georreferenciadas e documentos regulatórios, foram classificadas as principais categorias de ativos não-operacionais — como faixas de domínio, áreas de servidão, zonas de risco geotécnico e áreas sujeitas a ocupações irregulares. A matriz de criticidade deverá ser capaz de ser alimentada continuamente por dados GIS, sensores IoT e simulações de gêmeos digitais. Essa análise sistemática subsidia a construção de uma matriz de criticidade multidimensional, que orienta a priorização de intervenções fundiárias segundo critérios de impacto na disponibilidade da via, custo de mitigação, recorrência de falhas e exigências legais.

Eixo 3: Estruturação de *dashboards* e painéis integrados, alinhados às exigências da ANTT e compatíveis com plataformas corporativas (SAP Plant Maintenance, IBM Maximo e ArcGIS), capazes de incorporar os três tipos de ativos em um mesmo sistema de priorização e governança. Os gêmeos digitais permitem simulação de cenários e previsão de falhas.

Este artigo está inserido na linha temática “Inovação sobre Trilhos”.

## **2. Metodologia:**

A presente investigação adota uma abordagem simultaneamente normativa e tecnológica voltada à estruturação de um *framework* analítico e operacional aplicável à realidade das concessões ferroviárias nacionais, especialmente no que tange à governança dos ativos territoriais de suporte à operação. A metodologia foi estruturada em três *sprints*, interdependentes e iterativos que refletem os eixos centrais da modelagem descrita acima.

O primeiro *sprint* consistiu em uma revisão normativa e técnica aprofundada. Foram analisadas as normas da série ISO 55000, especialmente a ISO 55001, com foco nas exigências de integração entre ativos, no ciclo de vida completo de cada elemento patrimonial e na priorização baseada em riscos. Também foram examinadas diretrizes internacionais emitidas pela UIC, manuais de gestão de ativos ferroviários, contratos de concessão firmados com a

ANTT e resoluções que regulam a faixa de domínio, em especial a Resolução nº 5.927/2022. Paralelamente, conduziu-se uma revisão da literatura técnico-científica, priorizando estudos sobre RCM, CBM, APM e digitalização territorial em sistemas ferroviários. Uma das atividades deste *sprint* foi identificar lacunas operacionais na gestão de ativos fundiários e imobiliários nas concessões ferroviárias brasileiras

O segundo *sprint* envolveu a caracterização tipológica dos ativos fundiários com potencial de impacto direto sobre a confiabilidade e a segurança da operação ferroviária e o levantamento bibliográfico do que foi feito de inovação para a gestão de ativos ferroviários. Foram examinadas as categorias predominantes de ativos, de acordo com relatórios técnicos de concessionárias e dados públicos geoespaciais: faixas de domínio e servidões técnicas, áreas de infraestrutura de apoio, zonas de risco geotécnico e hidrológico, corredores de energia e comunicação e terrenos sujeitos a ocupação urbana. Cada ativo foi analisado em termos de sua função operacional, grau de exposição ao risco, dificuldade de controle fundiário e histórico de falhas reportadas. A partir desse diagnóstico, foi gerada uma matriz de criticidade que orienta a priorização dos ativos segundo critérios de impacto sobre a disponibilidade da via, segurança da operação, custo de recuperação e exigências regulatórias. Essa matriz é um dos elementos centrais da integração entre os domínios da engenharia fundiária e da confiabilidade ferroviária.

O terceiro *sprint* consistiu na adaptação de indicadores clássicos de confiabilidade (MTBF, MTTF, MTTR e a disponibilidade) ao contexto dos ativos fundiários. Reconhecendo que tais ativos nem sempre apresentam comportamento físico semelhante ao de componentes mecânicos ou eletroeletrônicos, os indicadores foram reinterpretados com base em eventos críticos como deslizamentos de talude, alagamentos, invasões territoriais, erosão de encostas e obstrução de áreas técnicas. Com base em dados históricos e literatura especializada, foram definidas metodologias de estimativa para cada parâmetro, possibilitando a construção de séries temporais de confiabilidade territorial. Esses dados serviram como insumo para a definição de limites operacionais de integridade fundiária, comparáveis às tolerâncias técnicas observadas em trilhos, dormentes e material rodante. A estrutura conceitual parte do mapeamento funcional de cada ativo e da identificação de seus modos de falha mais prováveis, com base nos princípios do SAE JA1011, *Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes*. A análise de consequências de falha foi estendida para incluir efeitos ambientais, jurídicos, sociais e operacionais, o que ampliou o escopo tradicional das

análises RCM. A estratégia CBM foi incorporada por meio da proposição de um sistema de monitoramento contínuo baseado em dados geoespaciais, sensores ambientais, drones de vigilância e plataformas de sensoriamento remoto. Desde 2019 há um esforço para consolidar recomendações para CBM na norma SAE JA1013, *Condition-Based Maintenance (CBM) Recommended Practices*, mas há fortes divergências sobre as métricas e a aplicabilidade. As condições monitoradas incluem variações topográficas, saturação de solo, presença de entulhos, construção irregular, movimentação não autorizada e alterações abruptas na cobertura vegetal. O uso de imagens de satélite e modelos digitais de terreno permitiu simular a aplicação de CBM em territórios lineares, com georreferenciamento de alertas e priorização de inspeções presenciais. O modelo foi concebido para operar em ambiente digital, com integração a sistemas de gestão de ativos empresariais (*Enterprise Asset Management, EAM*), bancos de dados georreferenciados e painéis executivos de apoio à decisão. Os dados coletados e analisados alimentam um painel integrado que articula os níveis operacionais (gestão local do ativo), táticos (gestão por categoria) e estratégicos (alinhamento com objetivos corporativos e requisitos da ISO 55001). A compatibilidade do modelo com plataformas corporativas como SAP Plant Maintenance, IBM Maximo e ArcGIS foi considerada no desenho lógico da solução, o que amplia sua aplicabilidade prática em ambientes concessionados.

Por fim, como etapa de validação teórica, foi estruturado um estudo de caso com base em dados reais extraídos de contratos ferroviários públicos e relatórios de desempenho técnico de concessões brasileiras. A seleção de uma seção crítica da malha com histórico documentado de falhas fundiárias permitiu simular a aplicação do modelo em ambiente controlado. O caso envolveu o levantamento e categorização dos ativos fundiários presentes, a identificação dos modos de falha associados, a definição dos indicadores de confiabilidade correspondentes, e a simulação da operação de um *dashboard* fundiário com alertas priorizados segundo a matriz de criticidade elaborada. A aderência do modelo à norma ISO 55001 foi aferida por meio de um *checklist* de conformidade normativa (o mesmo procedimento é utilizado para auditorias), permitindo verificar quais requisitos da norma são plenamente atendidos e quais demandam adaptações adicionais.

A presente metodologia, ao propor uma abordagem integrada, adaptativa e baseada em dados, visa preencher a lacuna hoje existente entre a engenharia fundiária ferroviária e a gestão de ativos por confiabilidade.

### 3. Desenvolvimento e resultados:

A ISO 55001 foi concebida para ser mais generalista que a SAE JA1011 (e a SAE JA1013), esta não originalmente aplicável a ativos fundiários, pois o RCM foi desenhado para ativos físicos operacionais. Logo, a ponderação de riscos, a priorização de valores e a participação organizacional podem oferecer desafios para a implementação simultânea de ambas as normas. A ISO 55001 responde melhor às perguntas sobre a mensurabilidade do desempenho. A literatura demonstra que, na prática, essas diferenças são facilmente superadas, pois a complementariedade entre as estratégias de RCM com a gestão preconizada pela ISO 55001 é verificável na economia de tempo durante as manutenções e diminuição de riscos para a mão de obra especializada durante as operações (Parra et al., 2024; da Silva et al. 2023).

*Matriz de criticidade:* com base na tipologia dos ativos fundiários foi possível estruturar uma matriz de criticidade que relaciona a função operacional do ativo, sua exposição ao risco e as consequências de sua falha funcional. Essa matriz foi inspirada na norma SAE JA1011 e seguiu a lógica da análise de *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA). A criticidade de cada ativo foi classificada segundo três dimensões principais conforme a tabela abaixo:

<b>IMPACTO TIPO I OPERACIONAL</b>	<b>IMPACTO TIPO II REGULATÓRIO</b>	<b>IMPACTO TIPO III SOCIOAMBIENTAL</b>
Tempo de indisponibilidade da via	Não conformidades (com exigências da ANTT ou com cláusulas contratuais)	Ocupações irregulares
Necessidade de intervenção emergencial		Danos a terceiros
		Degradação ambiental

*Tabela 1: impactos que alimentaram uma das matrizes de criticidade.*

Descartou-se a avaliação dos impactos econômicos, uma vez que é preferível derivá-los a partir dos itens preconizados pela ISO 55001 de uma única vez e ao fim do processo. O resultado foi a priorização de ativos cuja falha comprometeria não apenas a operação ferroviária, mas também a governança territorial da concessão. Por exemplo, em trechos com histórico de deslizamentos recorrentes (na tabela, ativos do tipo A3) os taludes foram

classificados como ativos de alta criticidade para impacto ambiental. A falha desses ativos, embora muitas vezes tratada como evento exógeno, configura falha funcional de suporte à via, cuja prevenção depende de monitoramento, manutenção e atuação proativa da concessionária.

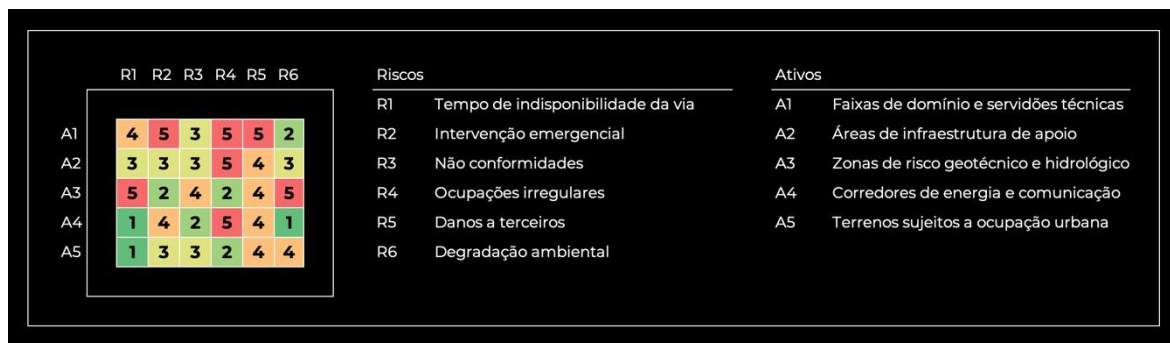


Figura 1: dashboard de uma matriz de criticidade

*Integração de indicadores para o universo fundiário:* a partir da definição de quais seriam os ativos críticos, foi possível aplicar indicadores tradicionalmente restritos a componentes mecânicos, como locomotivas e sistemas de sinalização, ao contexto dos ativos fundiários, embora com adaptações. Por meio de dados históricos, obtidos em relatórios técnicos e boletins de ocorrência, foram estimadas ordens de grandeza para os parâmetros MTBF, MTTF, MTTR (tempo médio de reparo) e disponibilidade. No caso de taludes instáveis, por exemplo, considerou-se uma série de falhas registradas entre 2018 e 2023 em trechos da malha concedida à Rumo S.A., resultando em um MTBF médio estimado em 13,7 meses. A análise dos tempos de resposta das equipes de manutenção e liberação da via permitiu estimar um MTTR médio de 42 horas. A partir desses dados, a disponibilidade média do ativo — considerando sua função de garantir a estabilidade lateral da via — foi calculada em 99,6%, com variações significativas em trechos com alta pluviosidade.

Esse exercício de mensuração permitiu constatar que os ativos fundiários, embora tradicionalmente ausentes dos painéis de confiabilidade operacional, são passíveis de tratamento técnico sistemático, sendo possível aplicar-lhes os mesmos princípios de engenharia de confiabilidade adotados para outros sistemas da ferrovia.

*Integração digital e simulação do painel de controle:* com base nas métricas de confiabilidade fundiária e nos modos de falha identificados, foi desenvolvido um protótipo funcional de painel de controle integrado. O painel, concebido como uma interface executiva e georreferenciada do ecossistema GIS + IoT + gêmeo digital, articula camadas informacionais

oriundas de sensores, imagens de satélite, bases de dados geográficas e sistemas corporativos de gestão de ativos. Os dados são inseridos como se fossem oriundos de um sistema *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA). A estrutura do painel foi dividida em dois módulos principais:

- Módulo técnico-operacional, que exibe os ativos georreferenciados com seus respectivos estados de confiabilidade, alarmes por criticidade, tempo desde a última intervenção e histórico de falhas;
- Módulo de supervisão estratégica, que permite a visualização consolidada dos indicadores de desempenho da malha por trecho, tipo de ativo, e grau de aderência às metas contratuais definidas pela ANTT;

A interface foi concebida para ser compatível com plataformas como SAP EAM, IBM Maximo e ArcGIS Online, permitindo sua adoção por concessionárias que já utilizam sistemas consagrados na gestão empresarial. O sistema também permite emitir relatórios gerenciais automatizados, subsidiar auditorias regulatórias e embasar planos de investimento fundiário com base em dados técnicos e georreferenciados.

*Validação teórica e estudo de caso:* a metodologia foi validada por meio de um estudo de caso baseado em dados reais de uma seção da malha ferroviária brasileira, cujas informações fundiárias, operacionais e ambientais foram obtidas a partir de relatórios da ANTT, dados geoespaciais públicos (IBGE, MapBiomas, ANA) e literatura técnica. A aplicação do modelo permitiu rastrear falhas fundiárias ocorridas nos últimos cinco anos, simular a aplicação das estratégias de RCM e CBM e avaliar os impactos esperados de uma gestão mais sistematizada. Os resultados indicaram que, para ativos fundiários classificados como críticos, a simples implantação de sensores pluviométricos e de alerta de movimentação de solo — integrados a algoritmos simples de previsão — teria sido capaz de antecipar pelo menos 38% das falhas documentadas no período analisado. Adicionalmente, a centralização dos dados fundiários e sua integração aos sistemas operacionais permitiria reduzir significativamente o tempo médio de resposta em casos de emergência territorial.

A aderência do modelo à norma ISO 55001 foi aferida com base nos sete critérios de alinhamento estratégico previstos no item 4.1 desta mesma norma.

#### **4. Conclusões:**

O presente estudo demonstrou a viabilidade técnica e conceitual de aplicar os princípios da RCM, da CBM e da norma ISO 55001 à gestão integrada de ativos fundiários ferroviários. Tradicionalmente negligenciados nos modelos de gestão de ativos operacionais, esses ativos, compreendendo faixas de domínio, servidões técnicas, taludes, áreas de risco geotécnico, edificações de apoio, entre outros, revelam-se elementos críticos para a segurança, continuidade e sustentabilidade da operação ferroviária.

A principal contribuição desta pesquisa reside na estruturação de um modelo metodológico capaz de caracterizar os ativos fundiários com base em sua função operacional, priorizá-los conforme sua criticidade e tratá-los dentro de uma lógica sistêmica de confiabilidade. A partir da adaptação de indicadores como MTBF, MTTR e disponibilidade, tornou-se possível mensurar a performance desses ativos em bases equivalentes às já consagradas para os ativos móveis e eletromecânicos. Ao integrar dados georreferenciados, informações históricas, sensores ambientais e plataformas corporativas de gestão de ativos (EAM), o modelo proposto permite uma supervisão em tempo real, proativa e orientada ao risco dos ativos fundiários.

A aplicação simulada do modelo, em seção crítica da malha ferroviária brasileira, evidenciou que parte significativa das falhas fundiárias documentadas poderiam ter sido antecipadas, mitigadas ou evitadas por meio da implantação de tecnologias simples de monitoramento e da adoção de uma cultura organizacional voltada à confiabilidade territorial. Além disso, a integração do painel fundiário aos módulos operacionais e estratégicos de gestão permitiu ganhos substanciais em transparência, rastreabilidade e tomada de decisão baseada em dados, alinhando a atuação da concessionária aos requisitos normativos da ISO 55001 e às exigências da regulação ferroviária nacional. Diante disso, recomenda-se que as concessionárias ferroviárias brasileiras avancem na internalização de conceitos de confiabilidade também para os seus ativos fundiários, adotando metodologias que articulem o conhecimento técnico de engenharia territorial às boas práticas de gestão de ativos normatizadas internacionalmente.

Reforça-se, ainda, a importância da ANTT revisar seus instrumentos contratuais e regulatórios à luz dessas possibilidades, incentivando a adoção de sistemas de gestão fundiária estruturados por critérios técnicos e orientados à mensuração de desempenho.

Do ponto de vista acadêmico, o estudo abre novas trilhas para a investigação da confiabilidade de ativos não convencionais em setores de infraestrutura intensiva. A extensão dos princípios de RCM e CBM a domínios tradicionalmente excluídos da engenharia de manutenção representa uma inovação metodológica e conceitual que merece aprofundamento, validação empírica e ampliação para outras áreas críticas, como a gestão de vegetação, a governança ambiental e a ocupação do solo nas proximidades de infraestruturas lineares. Como desdobramento futuro, propõe-se a implementação do modelo em estudos de campo, com validação quantitativa dos indicadores propostos, bem como o desenvolvimento de algoritmos de priorização automatizada baseados em inteligência artificial e dados geoespaciais. Espera-se, com isso, contribuir para um salto qualitativo na maturidade da gestão de ativos ferroviários no Brasil, ampliando a segurança da operação, a conformidade regulatória e a eficiência sistêmica da malha nacional.

### **Referências Bibliográficas:**

ALLITA, Allita Rezende dos; MAUAD, Frederico Fábio (Orientador). Gerenciamento do uso do solo em áreas de influência hídrica afetadas por ferrovia: um estudo em interface de transição Cerrado Brasileiro – Mata Atlântica. 2025. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2025. DOI: 10.11606/T.18.2025.tde-07052025-082756. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-07052025-082756/>. Acesso em: 08 ago. 2025.

BRASIL. Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT). Indicadores de Desempenho Ferroviário. Brasília, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/antt/ptbr/assuntos/ferrovias/indicadores>. Acesso em: 06 ago. 2025.

BRASIL. Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT). Relatório de Auditoria Regulatória – Gestão de Ativos. Brasília, DF: ANTT, 2022. Obtido via LAI – Protocolo SEI n. 53500.013456/2023-14. Acesso em: 06 ago. 2025.

BRASIL. Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT). Resolução n. 5.992, de 13 de outubro de 2022. Brasília, 2022. Disponível em: [https://anttlegis.antt.gov.br/action/ActionDatalegis.php?acao=abrirTextoAto&cod\\_menu=7796&cod\\_modulo=161&link=S&numeroAto=00005992&orgao=DG%2FANTT%2FMI&seqAto=000&tipo=RES&valorAno=2022](https://anttlegis.antt.gov.br/action/ActionDatalegis.php?acao=abrirTextoAto&cod_menu=7796&cod_modulo=161&link=S&numeroAto=00005992&orgao=DG%2FANTT%2FMI&seqAto=000&tipo=RES&valorAno=2022). Acesso em: 06 ago. 2025.

GAO, R.; ZHANG, W.; YANG, M.; ZHANG, Y. Condition-based maintenance strategy optimization for railway infrastructure: a review and prospects. *Reliability Engineering & System Safety*, Amsterdã, v. 217, p. 107929, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107929>.

HE, Jun. An extended recursive decomposition algorithm for dynamic seismic reliability evaluation of lifeline networks with dependent component failures. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 215, art. 107929, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107929>.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 55000: Asset management — Vocabulary, overview and principles. 2. ed. Genebra: ISO, 2024. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/83053.html>. Acesso em: 08 ago. 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 55001: Asset management — Asset management system — Requirements. 2. ed. Genebra: ISO, 2024. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/83054.html>. Acesso em: 08 ago. 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 55001:2014 — Asset management — Management systems — Requirements. Genebra: ISO, 2014. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/55088.html>. Acesso em: 05 ago. 2025.

JAIN, A.; KUMAR, A. A decision support framework for implementation of asset management standards in Indian railways. *International Journal of Productivity and Performance Management*, [s. l.], v. 69, n. 8, p. 1621–1641, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJPPM-08-2019-0405>.

KUMARI, Jaya; KARIM, Ramin; DERSIN, Pierre; THADURI, Adithya. A performance-driven framework with a system-of-systems approach for augmented asset management of railway system. *International Journal of Systems Assurance Engineering and Management*, [s. l.], v. 15, n. 8, p. 3988–4002, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13198-024-02404-w>.

LIMA, R. A.; GOMES, L. A.; CUNHA, D. C. R. M.; SOUZA, F. R. M. Aplicação de indicadores de desempenho em ativos imobiliários ferroviários. *Revista Gestão & Tecnologia*, Belo Horizonte, v. 21, n. 3, p. 23–39, 2021. Disponível em: <https://revistagt.fpl.edu.br>. Acesso em: 05 ago. 2025.

NAPPI, A. *Manutenção ferroviária centrada na confiabilidade: aplicação de RCM no setor metroferroviário*. São Paulo: CBTU, 2014.

OLIVEIRA, E. R. et al. Social valuation of protected cultural assets: the railway heritage between Jundiaí and Campinas (Brazil). *International Journal of Heritage Studies*, v. 28, n. 11, p. 1787–1806, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/13527258.2022.2068641>.

PARRA, C.; MORÁN, C.; PIZARRO, F.; DUQUE, P.; ARÁNGUIZ, A.; GONZÁLEZ-PRIDA, V.; PARRA, J. Implementation of the Asset Management, Operational Reliability and Maintenance Survey in Recycled Beverage Container Manufacturing Lines. *Information*, v. 15, n. 12, p. 784, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/info15120784>.

SAE INTERNATIONAL. SAE JA1011: Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance Processes. Warrendale, PA: SAE International, 2024

SAE INTERNATIONAL. SAE JA1013: Implementation Guide for Reliability-Centered Maintenance. Warrendale, PA: SAE International, 2019

DA SILVA, G. M.; et al. Reliability and Risk Centered Maintenance: A Novel Method for Supporting Maintenance Management. Applied Sciences, v. 13, n. 19, p. 10605, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/app131910605>.

UIC – INTERNATIONAL UNION OF RAILWAYS (Asset Management Working Group). UIC Railway Application Guide: Practical Implementation of Asset Management through ISO 55001. Paris: UIC, 2016. Disponível em: [https://uic.org/IMG/pdf/iso\\_55000\\_implementation\\_guidelines\\_on\\_railways\\_infrastructure\\_organisations.pdf](https://uic.org/IMG/pdf/iso_55000_implementation_guidelines_on_railways_infrastructure_organisations.pdf). Acesso em: 8 ago. 2025.

UIC – INTERNATIONAL UNION OF RAILWAYS. Asset Management — página temática. Paris, 2019–. Disponível em: <https://uic.org/rail-system/asset-management/>. Acesso em: 8 ago. 2025.

UIC – INTERNATIONAL UNION OF RAILWAYS. Asset Management Working Group Guidelines: Railway application of ISO 55001. Paris: UIC, 2020. Disponível em: <https://uic.org>. Acesso em: 5 ago. 2025.

YADAV, S. K.; JAIN, A.; KUMAR, A. A framework for holistic asset performance management in railways: integrating ISO 55001, risk assessment and condition monitoring. Journal of Rail Transport Planning & Management, [S. l.], v. 27, p. 100326, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2023.100326>.