



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES

**CAMILA LIMA MAIA**

**MÉTODO INTEGRADO DE ANÁLISE ECONÔMICA E AMBIENTAL DO CICLO  
DE VIDA DE PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS BRASILEIROS PARA APOIO À  
TOMADA DE DECISÃO EM MANUTENÇÃO E REABILITAÇÃO**

**FORTALEZA**

**2026**

CAMILA LIMA MAIA

MÉTODO INTEGRADO DE ANÁLISE ECONÔMICA E AMBIENTAL DO CICLO DE  
VIDA DE PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS BRASILEIROS PARA APOIO À  
TOMADA DE DECISÃO EM MANUTENÇÃO E REABILITAÇÃO

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito para a obtenção do título de Doutora em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes

Orientador: Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira.

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Augusto Uchôa da Silva.

FORTALEZA

2026

CAMILA LIMA MAIA

MÉTODO INTEGRADO DE ANÁLISE ECONÔMICA E AMBIENTAL DO CICLO DE VIDA DE PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS BRASILEIROS PARA APOIO À TOMADA DE DECISÃO EM MANUTENÇÃO E REABILITAÇÃO

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito para a obtenção do título de Doutora em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes  
Orientador: Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira.  
Coorientador: Prof. Dr. Carlos Augusto Uchôa da Silva.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Carlos Augusto Uchôa da Silva (Coorientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Ernesto Ferreira Nobre Júnior (Examinador Interno)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Francisco Gildemir Ferreira da Silva (Examinador Interno)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Profa. Dra. Cláudia Azevedo Pereira (Examinador Externo)  
Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)

---

Prof. Dr. Filipe Almeida Corrêa do Nascimento (Examinador Externo)  
Instituto Militar de Engenharia (IME)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, Senhor de todas as coisas, por nunca soltar a minha mão. Por me sustentar nos dias difíceis, me fortalecer quando pensei em desistir e me permitir chegar até aqui com fé, coragem e esperança renovadas.

À minha família, meu alicerce e meu refúgio. Em especial à minha mãe, Maria Cirleide, meu maior exemplo de força, amor e dedicação, e aos meus irmãos, Paulo Robson e Pedro Henrique, por todo o apoio, carinho e amor incondicional. Obrigada por compreenderem minhas ausências impostas pelas demandas do doutorado e, principalmente, por estarem presentes nos momentos em que eu mais precisei. Nada disso teria sido possível sem vocês.

Ao restante da minha família, minhas cunhadas, minha sobrinha e minhas tias, em especial à minha tia Cleide e à minha tia Bia, minha eterna gratidão por me acolherem em Fortaleza desde a época do mestrado, por abrirem as portas da casa e do coração, e por caminharem comigo em todos os momentos em que precisei de apoio, cuidado e amor.

Aos meus amigos, antigos e novos, deixo o meu mais sincero obrigado por todo o incentivo, pelas palavras de conforto, pelas risadas e por nunca deixarem de acreditar em mim. Em especial, às minhas amigas de infância, minhas maiores torcedoras e por quem tenho profunda admiração, Bruna, Isabelly, Marcela, Mariana e Juliana. Mesmo à distância, sei que sempre vibraram comigo, celebraram cada conquista e se alegraram verdadeiramente com este momento tão importante da minha vida.

Aos amigos que fiz no PETRAN, como o Alisson, o João Victor, a Larissa, o Victor, o Wémenson, o Sombra, a Rayssa, o Jefferson, o Lucas e todos os outros que não citei, como os demais orientados do professor Heber, obrigada por tornarem essa jornada mais leve, humana e prazerosa. Obrigada por compartilharem comigo não apenas conhecimento, mas também momentos inesquecíveis em congressos, viagens, passeios e tantas memórias que levarei para sempre.

Um agradecimento mais do que especial aos meus amigos Levi e Breno. Vocês foram apoio, incentivo, parceria e abrigo nos momentos mais difíceis. Tenho certeza de que não teria chegado até aqui sem a presença constante de vocês.

Um agradecimento saudoso e cheio de amor ao Pedro Henrique. Sua ausência dói, mas sua presença vive em mim todos os dias. Te amo, meu amigo. A gente se vê no céu.

Aos professores e servidores do DET e do PETRAN, minha profunda gratidão pelos ensinamentos, pela paciência e pela dedicação, que foram fundamentais para a construção deste trabalho.

Ao professor Uchôa, faltam palavras para expressar minha gratidão. Obrigada por tudo o que fez por mim: pelo acolhimento, pela defesa incansável, pelas conversas sinceras, pelos ensinamentos, pela confiança e até pelos puxões de orelha, sempre necessários e cheios de cuidado.

Ao meu orientador, professor Heber, minha gratidão imensa por me receber tão bem em seu grupo de orientados, por todo o apoio e auxílio ao longo desta pesquisa, pela confiança, pela parceria e por ser um exemplo de profissionalismo. Obrigada também pelas risadas, pelos cafés e pela leveza que tornaram essa caminhada mais bonita.

Aos professores membros da banca examinadora, agradeço pelas contribuições valiosas, pelo tempo dedicado e pelas reflexões que enriqueceram este trabalho.

À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) pela bolsa de doutorado concedida.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste sonho. Cada gesto, palavra e apoio fizeram a diferença para que este trabalho se tornasse realidade.

## RESUMO

A crescente demanda por segurança e eficiência operacional nos aeroportos reforça a necessidade de soluções mais sustentáveis e economicamente eficientes para a gerência de pavimentos aeroportuários. Nesse contexto, a Análise de Custo do Ciclo de Vida (ACCV) apresenta-se como uma ferramenta para apoiar decisões racionais ao longo do tempo, permitindo avaliar os custos associados a diferentes estratégias de manutenção e reabilitação (M&R). No entanto, muitos estudos de ACCV concentram-se em parâmetros funcionais, como o *Pavement Condition Index* (PCI), sem incorporar indicadores relacionados à resistência à derrapagem, que são fundamentais para a segurança de de pousos e decolagens. Além disso, a ACCV não incorpora os impactos ambientais das intervenções de M&R. Diante desse contexto, este estudo teve o objetivo de desenvolver um método integrado de análise econômica e ambiental do período de projeto de pavimentos aeroportuários brasileiros, que integra ACCV e a Análise do Ciclo de Vida (ACV), considerando parâmetros funcionais, estruturais e de resistência à derrapagem. Foram utilizados dados de uma pista de pouso e decolagem (PPD) brasileira, disponibilizados pela Agência Nacional de Aviação Civil, referentes ao período de 2014 a 2023, incluindo o PCI, o coeficiente de atrito, a macrotextura e o *Cumulative Damage Factor* (CDF), obtido por meio do *software* FAARFIELD 2.1.1. Modelos de previsão foram desenvolvidos em *Python*, utilizando redes neurais recorrentes do tipo *Gated Recurrent Unit* (GRU) para o coeficiente de atrito e a macrotextura, e um modelo de taxa de deterioração para o PCI. A combinação das previsões de desempenho com a análise estrutural realizada no *software* FAARFIELD 2.1.1 permitiu identificar as necessidades de M&R e simular diferentes cenários de intervenção para horizontes de 20, 30 e 40 anos, por meio de árvores de decisão. O método proposto integrou custos financeiros e ambientais, sendo estes últimos estimados a partir da ACV realizada no *software* SimaPro Demo, com o método ReCiPe Midpoint H, considerando 1m<sup>2</sup> de pista, com posterior valoração do CO<sub>2</sub> equivalente. Adicionalmente, foi realizada uma análise de sensibilidade considerando diferentes taxas de desconto. Os modelos de coeficiente de atrito e macrotextura apresentaram desempenho adequado, embora a precisão do modelo de macrotextura diminua para valores mais elevados. A manutenção preventiva é a alternativa mais vantajosa em horizontes de curto prazo, reduzindo o Valor Presente Líquido (VPL) dos custos de M&R e postergando intervenções corretivas de elevado custo. Em horizontes mais longos, entretanto, os impactos ambientais aumentam em função da recorrência de intervenções corretivas tardias, tornando o VPL dos custos ambientais mais sensível ao acúmulo de emissões ao longo do tempo. Ainda assim, o VPL dos custos totais manteve-se menor no cenário de priorização da manutenção preventiva, evidenciando sua robustez econômica. A análise de sensibilidade da taxa de desconto mostrou que, em 20 anos, o VPL total apresentou baixa variação, enquanto em 30 anos a diferença entre as taxas foi moderada. Em 40 anos, os custos tardios, especialmente os ambientais, tornaram o VPL total mais sensível às variações da taxa de desconto. De maneira geral, o método proposto demonstra potencial para apoiar a tomada de decisão na definição de estratégias de M&R. Ao integrar desempenho funcional, resistência à derrapagem, comportamento estrutural e impactos ambientais, esta pesquisa contribui para práticas de gerência de pavimentos aeroportuários mais eficientes, sustentáveis e compatíveis com as crescentes demandas de segurança operacional e racionalidade econômica nos aeroportos do Brasil.

Palavras-Chave: ACCV; ACV; manutenção e reabilitação; modelos preditivos; custos ambientais.

## ABSTRACT

The growing demand for safety and operational efficiency in airports reinforces the need for more sustainable and economically efficient solutions for airport pavement management. In this context, Life-Cycle Cost Analysis (LCCA) emerges as a tool to support rational decision-making over time, allowing the evaluation of costs associated with different maintenance and rehabilitation (M&R) strategies. However, many LCCA studies focus primarily on functional parameters, such as the Pavement Condition Index (PCI), without incorporating indicators related to skid resistance, which are essential for the safety of landing and takeoff operations. In addition, LCCA does not incorporate the environmental impacts associated with M&R interventions. Given this context, this study aimed to develop an integrated economic and environmental analysis method for the design period of Brazilian airport pavements, combining Life-Cycle Cost Analysis (LCCA) and Life-Cycle Assessment (LCA), while considering functional, structural, and skid resistance parameters. Data from a Brazilian runway, provided by the National Civil Aviation Agency, covering the period from 2014 to 2023, were used, including PCI, friction coefficient, macrotexture, and the Cumulative Damage Factor (CDF), obtained using the FAARFIELD 2.1.1 software. Prediction models were developed in Python, using Gated Recurrent Unit (GRU) recurrent neural networks for the friction coefficient and macrotexture, and a deterioration rate model for PCI. The combination of performance predictions with the structural analysis performed in FAARFIELD 2.1.1 allowed the identification of M&R needs and the simulation of different intervention scenarios for time horizons of 20, 30, and 40 years through decision trees. The proposed method integrated both financial and environmental costs. The environmental impacts were estimated through an LCA conducted in the SimaPro Demo software, using the ReCiPe Midpoint (H) method, considering a functional unit of 1 m<sup>2</sup> of runway, followed by the monetization of CO<sub>2</sub> equivalent emissions. Additionally, a sensitivity analysis was carried out considering different discount rates. The friction coefficient and macrotexture models presented satisfactory performance, although the accuracy of the macrotexture model decreased for higher values. Preventive maintenance proved to be the most advantageous alternative in short-term horizons, reducing the Net Present Value (NPV) of M&R costs and postponing high-cost corrective interventions. However, in longer horizons, environmental impacts increased due to the recurrence of delayed corrective interventions, making the NPV of environmental costs more sensitive to the accumulation of emissions over time. Nevertheless, the NPV of total costs remained lower in the scenario prioritizing preventive maintenance, demonstrating its economic robustness. The sensitivity analysis of the discount rate showed that, over a 20-year horizon, the total NPV presented low variation, while over 30 years the difference between discount rates was moderate. Over a 40-year horizon, delayed costs—particularly environmental costs—made the total NPV more sensitive to variations in the discount rate. Overall, the proposed method demonstrates strong potential to support decision-making in defining M&R strategies. By integrating functional performance, skid resistance, structural behavior, and environmental impacts, this research contributes to more efficient and sustainable airport pavement management practices, aligned with the increasing demands for operational safety and economic rationality in Brazilian airports.

Keywords: LCCA; LCA; maintenance and rehabilitation; predictive models; environmental costs.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Parâmetros do PCI do pavimento. ....	26
Figura 2 - Árvore de decisão para seleção das atividades de M&R (defeito – trincas).....	38
Figura 3 - Arquitetura da rede GRU.....	43
Figura 4 - Etapas do método de pesquisa. ....	56
Figura 5 - Análise de Componentes Principais. ....	61
Figura 6 - Carga dos Componentes Principais. ....	62
Figura 7 - ACP da macrotextura.....	65
Figura 8 - Carga dos Componentes Principais da macrotextura. ....	66
Figura 9 - Árvore de decisão. ....	71
Figura 10 - Modificação na árvore de decisão. ....	76
Figura 11 - Fluxograma de funcionamento do método integrado de ACCV e ACV.....	77
Figura 12 - Coeficiente de atrito a 3m D do eixo da PPD - 2014 a 2023.....	80
Figura 13 - Coeficiente de atrito a 3m E do eixo da PPD - 2014 a 2023. ....	81
Figura 14 - Boxplot do coeficiente de atrito a 3m D do eixo da PPD - 2014 a 2023.....	81
Figura 15 - Boxplot do coeficiente de atrito a 3m E do eixo da PPD - 2014 a 2023. ....	82
Figura 16 - Coeficiente de atrito a 6m D do eixo da PPD - 2014 a 2023.....	82
Figura 17 - Coeficiente de atrito a 6m E do eixo da PPD - 2014 a 2023. ....	83
Figura 18 - Boxplot do coeficiente de atrito a 6m D do eixo da PPD - 2014 a 2023.....	83
Figura 19 - Boxplot do coeficiente de atrito a 6m E do eixo da PPD - 2014 a 2023. ....	84
Figura 20 - Macrotextura da PPD entre os anos 2014 a 2023.....	86
Figura 21 - Boxplot da macrotextura da PPD entre os anos 2014 a 2023.....	86
Figura 22 - Relação entre o PCI e o coeficiente de atrito para o ano de 2018. ....	87
Figura 23 - Relação entre o PCI e o coeficiente de atrito para o ano de 2021. ....	87
Figura 24 - Relação entre o PCI e o coeficiente de atrito para o ano de 2022. ....	88
Figura 25 - Relação entre o PCI e o coeficiente de atrito para o ano de 2023. ....	88
Figura 26 - Relação entre o PCI e a profundidade da macrotextura (PM) - 2018.....	90
Figura 27 - Relação entre o PCI e a profundidade da macrotextura (PM) - 2021.....	90
Figura 28 - Relação entre o PCI e a profundidade da macrotextura (PM) - 2022.....	90
Figura 29 - Relação entre o PCI e a profundidade da macrotextura (PM) - 2023.....	91
Figura 30 - Curvas de deterioração do PCI - 20 anos.....	93
Figura 31 - Curvas de deterioração do PCI - 30 anos.....	93
Figura 32 - Curvas de deterioração do PCI - 40 anos.....	93

Figura 33 - Valores reais versus valores previstos (coeficiente de atrito).....	98
Figura 34 - Histograma dos resíduos do modelo de coeficiente de atrito. ....	99
Figura 35 - Valores reais versus valores previstos (macrotextura). ....	100
Figura 36 - Histograma dos resíduos do modelo de macrotextura.....	101
Figura 37 - Evolução dos parâmetros de resistência à derrapagem ao longo do tempo.....	102
Figura 38 - Custos de manutenção – 20 anos. ....	106
Figura 39 - Custos de Manutenção - 30 anos. ....	108
Figura 40 - Custos de manutenção - 40 anos.....	109
Figura 41 - ACV - Remoção de Borracha (caracterização).....	110
Figura 42 - ACV - Remoção de Borracha (normalização).....	111
Figura 43 - ACV - Microrrevestimento (caracterização). ....	111
Figura 44 - ACV - Microrrevestimento (normalização).....	112
Figura 45 - ACV - Recapeamento (caracterização).....	112
Figura 46 - Recapeamento (normalização).....	113
Figura 47 - ACV - Reforço (caracterização). ....	113
Figura 48 - ACV - Reforço (normalização). ....	114
Figura 49 - ACV - Reconstrução (caracterização). ....	114
Figura 50 - ACV - Reconstrução (normalização).....	115
Figura 51 - ACV - Reabilitação (caracterização). ....	115
Figura 52 - ACV - Reabilitação (normalização). ....	116
Figura 53 - Total de CO <sub>2e</sub> por ano – 20 anos.....	118
Figura 54 - Custo das emissões de CO <sub>2e</sub> por ano – 20 anos. ....	119
Figura 55 - Total de CO <sub>2e</sub> por ano – 30 anos.....	119
Figura 56 - Custo das emissões de CO <sub>2e</sub> por ano – 30 anos. ....	120
Figura 57 - Total de CO <sub>2e</sub> por ano – 40 anos.....	120
Figura 58 - Custo das emissões de CO <sub>2e</sub> por ano – 40 anos. ....	121
Figura 59 - Custos de M&R, priorizando manutenção preventiva - 20 anos. ....	122
Figura 60 - Análise ambiental - 20 anos.....	123
Figura 61 - Custos de M&R, priorizando manutenção preventiva - 30 anos. ....	124
Figura 62 - Análise ambiental - 30 anos.....	125
Figura 63 - Custos de M&R, priorizando manutenção preventiva - 40 anos. ....	126
Figura 64 - Análise ambiental - 40 anos.....	127
Figura 65 - Cenário de Reconstrução do revestimento - 30 anos (VPL Monetário). ....	129
Figura 66 - Cenário de Reconstrução do revestimento - 30 anos (Emissões de CO <sub>2e</sub> ). ....	129

Figura 67 - Cenário de Reconstrução do revestimento - 30 anos (VPL Ambiental).....	130
Figura 68 - Cenário de Reconstrução do revestimento - 40 anos (VPL Monetário).....	131
Figura 69 - Cenário de Reconstrução do revestimento - 40 anos (Emissões de CO <sub>2e</sub> ). .....	131
Figura 70 - Cenário de Reconstrução do revestimento - 40 anos (VPL Ambiental).....	132
Figura 71 - Análise de sensibilidade. ....	136
Figura 72 - Módulo 1 - Modelos de Previsão.....	139
Figura 73 - Módulo 2 – ACCV e ACV. ....	139
Figura 74 - Análise de sensibilidade de Índice de Custo/Benefício.....	140

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estudos sobre SGPA. ....	21
Tabela 2 - Frequência de medição do PCI.....	27
Tabela 3 - Estudos que usaram o PCI para avaliar a condição do pavimento. ....	27
Tabela 4 - Parâmetros de coeficiente de atrito por tipo de equipamento de medição. ....	31
Tabela 5 - Localização das medições de atrito. ....	31
Tabela 6 - Classificação da macrotextura.....	32
Tabela 7 - Frequência mínima de remoção de borracha.....	32
Tabela 8 - Estudos sobre os parâmetros de resistência à derrapagem. ....	32
Tabela 9 - Limites do CDF. ....	35
Tabela 10 - Estudos sobre dimensionamento de pavimento aeroportuário e uso do CDF.....	35
Tabela 11 - Atividades de M&R para pavimentos aeroportuários. ....	39
Tabela 12 - Estudos sobre M&R de pavimentos. ....	39
Tabela 13 - Estudos sobre modelos de previsão de desempenho de pavimentos aeroportuários. .....	45
Tabela 14 - Principais Softwares de ACCV. ....	49
Tabela 15 - Estudos sobre ACCV em pavimentos aeroportuários. ....	50
Tabela 16 - Estudos sobre ACV em pavimentos aeroportuários.....	53
Tabela 17 - Relatórios fornecidos pela ANAC.....	56
Tabela 18 - Redução média estimada do PCI para pavimentos flexíveis.....	58
Tabela 19 - Deterioração do PCI adotada neste estudo. ....	59
Tabela 20 - Exemplo do banco de dados de coeficiente de atrito. ....	62
Tabela 21 - Exemplo do banco de dados de coeficiente de macrotextura.....	66
Tabela 22 - Módulo de Resiliência.....	68
Tabela 23 - Mix de aeronaves.....	68
Tabela 24 - Estratégias de M&R. ....	69
Tabela 25 - Inventário de entradas e saídas por serviço de M&R na PPD (UF: 1 m <sup>2</sup> ).....	74
Tabela 26 - Análise Descritiva do PCI no período estudado.....	78
Tabela 27 - Análise descritiva do coeficiente de atrito. ....	79
Tabela 28 - Análise descritiva da macrotextura (em mm) – 2014 a 2023.....	85
Tabela 29 - Correlação de Spearman entre o PCI e o coeficiente de atrito.....	89
Tabela 30 - Correlação de Spearman entre o PCI e macrotextura (PM). ....	92
Tabela 31 - Classificação do PCI por seção do pavimento. ....	95

Tabela 32 - Hiperparâmetros do modelo de coeficiente de atrito.....	97
Tabela 33 - Métricas de avaliação do modelo de coeficiente de atrito.....	98
Tabela 34 - Hiperparâmetros do modelo de macrotextura. ....	100
Tabela 35 - Métricas de avaliação do modelo de macrotextura. ....	100
Tabela 36 - Previsão da classificação da resistência à derrapagem da PPD.....	103
Tabela 37 - Resumo – Custos de M&R.....	109
Tabela 38 - Resumo – ACV .....	116
Tabela 39 - Resumo – Análise Ambiental.....	121
Tabela 40 - Resumo – Cenário de priorização de manutenção preventiva. ....	128
Tabela 41 - Resumo da análise de cenários de reconstrução.....	133
Tabela 42 - Custos Totais. ....	133
Tabela 43 - Custos Totais - Reconstrução.....	134
Tabela 44 - Índice de Custo de Oportunidade.....	135

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1 Contextualização .....	15
1.2 Problema de pesquisa .....	16
1.3 Justificativa .....	17
1.4 Objetivos .....	17
1.6 Estrutura do trabalho .....	18
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>19</b>
2.1 Considerações sobre os Sistemas de Gerência de Pavimentos Aeroportuários (SGPA).....	19
2.2 Avaliação da Condição do Pavimento Aeroportuário .....	24
2.2.1 <i>Pavement Condition Index (PCI)</i> .....	25
2.2.2 Condições de Resistência à Derrapagem.....	30
2.2.3 <i>Cumulative Damage Factor (CDF)</i> .....	35
2.3 Manutenção e Reabilitação do Pavimento Aeroportuário .....	37
2.4 Uso de Redes Neurais Artificiais em Modelos de Previsão de Desempenho de Pavimentos Aeroportuários .....	41
2.5 Análise do Custo de Ciclo de Vida e Análise do Ciclo de Vida do Pavimento .....	47
<b>3 MÉTODO DE PESQUISA .....</b>	<b>55</b>
3.1 Estruturação do banco de dados .....	56
3.2 Relação entre o PCI e os parâmetros de resistência à derrapagem .....	57
3.3 Modelo de previsão do PCI.....	58
3.4 Modelo de previsão do coeficiente de atrito .....	60
3.5 Modelo de previsão da macrotextura .....	64
3.6 Avaliação Estrutural do Pavimento .....	68
3.7 Definição das Estratégias de M&R .....	69
3.8 Árvore de decisão.....	70
3.9 Análise de Custo do Ciclo de Vida .....	72

<b>3.10 Análise de Ciclo de Vida .....</b>	<b>72</b>
<b>3.10.1 Definição de objetivo .....</b>	<b>72</b>
<b>3.10.2 Definição de escopo.....</b>	<b>73</b>
<b>3.10.3 Unidade funcional.....</b>	<b>73</b>
<b>3.10.4 Inventário do ciclo de vida (ICV).....</b>	<b>73</b>
<b>3.10.5 Avaliação de impactos do ciclo de vida.....</b>	<b>74</b>
<b>3.10.6 Monetização dos impactos ambientais.....</b>	<b>75</b>
<b>3.11 Análise de cenários de manutenção e reabilitação (M&amp;R).....</b>	<b>75</b>
<b>3.12 Análise de Oportunidade e Análise de Sensibilidade .....</b>	<b>76</b>
<b>3.13 Método Proposto.....</b>	<b>77</b>
<b>4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>78</b>
<b>4.1 Análise descritiva.....</b>	<b>78</b>
<b>4.2 Relação entre o PCI e os parâmetros de resistência à derrapagem.....</b>	<b>87</b>
<b>4.3 Resultados do PCI .....</b>	<b>92</b>
<b>4.4 Resultados da resistência à derrapagem .....</b>	<b>96</b>
<b>4.5 Resultados da avaliação estrutural .....</b>	<b>104</b>
<b>4.6 Resultados da Análise de Custo de Ciclo de Vida (ACCV) .....</b>	<b>106</b>
<b>4.7 Resultados da Análise de Ciclo de Vida (ACV) .....</b>	<b>110</b>
<b>4.8 Resultados dos custos ambientais.....</b>	<b>118</b>
<b>4.9 Análise de Cenários de Manutenção e Reabilitação (M&amp;R).....</b>	<b>121</b>
<b>4.10 Custos Totais .....</b>	<b>133</b>
<b>4.11 Análise de Custo de Oportunidade .....</b>	<b>135</b>
<b>4.12 Análise de Sensibilidade.....</b>	<b>136</b>
<b>4.13 Disponibilização do método proposto .....</b>	<b>138</b>
<b>5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>142</b>
<b>5.1 Principais Conclusões.....</b>	<b>142</b>
<b>5.2 Limitações da pesquisa.....</b>	<b>144</b>

<b>5.3 Sugestão para trabalhos futuros .....</b>	<b>145</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>147</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresentam-se a contextualização do tema abordado nesta pesquisa, o problema, a justificativa, os objetivos geral e específicos, e a estrutura do trabalho.

### 1.1 Contextualização

A infraestrutura dos aeródromos, especialmente os pavimentos das pistas de pouso e decolagem (PPD), desempenha um papel fundamental na garantia da segurança operacional aeroportuária. As exigências por um nível de serviço elevado têm se intensificado, demandando um maior rigor no cumprimento das condições funcionais, estruturais e de resistência à derrapagem das PPD.

Entre 2010 e 2024, foram registrados 2.450 acidentes na aviação civil brasileira. Apenas no ano de 2024 foram registrados 175 acidentes, representando um aumento de 12,9% em relação aos 155 acidentes de 2023 (ANAC, 2024a). Cerca de 22,5% dos acidentes aéreos ocorridos entre 2016 e 2020 no país estão relacionados à excursão em pista, que acontece quando a aeronave se desloca para fora dos limites laterais ou das extremidades da pista durante as fases de pouso ou decolagem (ANAC, 2021). Um dos fatores determinantes para a ocorrência desse tipo de acidente é a qualidade do revestimento da PPD, o que torna necessária a manutenção adequada do pavimento para garantir operações aeroportuárias seguras.

Nesse cenário, devem ser aplicados procedimentos e métodos rigorosos para o planejamento e a execução das atividades de manutenção e reabilitação (M&R) dos pavimentos aeroportuários (Nascimento e Silva, 2021). Essas atividades devem incluir a avaliação de cenários futuros, a previsão do desempenho ao longo do ciclo de vida do pavimento e a utilização de ferramentas de apoio à tomada de decisão fundamentadas em critérios estabelecidos. A implementação dessas ferramentas deve ocorrer por meio de um Sistema de Gerência de Pavimentos Aeroportuários (SGPA).

Ao prever a condição futura do pavimento, o SGPA também auxilia a aplicação da Análise de Custo de Ciclo de Vida (ACCV) para as atividades de M&R (ANAC, 2017). A ACCV permite determinar a alternativa mais adequada para manter o pavimento em níveis aceitáveis de serviço e de segurança operacional, ao incorporar tanto custos diretos quanto indiretos. Fundamentada nos princípios da Engenharia Econômica, a ACCV avalia a eficiência econômica a longo prazo entre diferentes alternativas de investimento, buscando identificar a

opção que ofereça o menor custo total de ciclo de vida sem comprometer o desempenho do pavimento (Walls e Smith, 1998).

No entanto, os modelos de ACCV encontrados na literatura geralmente consideram apenas os aspectos funcionais do pavimento, muitas vezes com base no *Pavement Condition Index* (PCI), para definir estratégias de M&R (Maia *et al.*, 2022). Uma relação inversa entre o PCI e os parâmetros de resistência à derrapagem (coeficiente de atrito e macrotextura), relacionados à segurança operacional, foi observada por Oliveira *et al.* (2023), destacando a necessidade de integrar ambos na definição de estratégias de M&R e na análise de custos de longo prazo.

Além disso, a ACCV também não quantifica adequadamente os impactos ambientais e os respectivos custos das alternativas de M&R, apesar de sua importância para os projetos (Alaloul *et al.*, 2021). Adotar uma abordagem integrada de Análise de Ciclo de Vida (ACV), que inclui questões ambientais no processo, e de ACCV pode auxiliar na escolha de alternativas de M&R mais econômicas e ambientalmente sustentáveis, melhorando o gerenciamento da infraestrutura aeroportuária, notadamente dos pavimentos das PPD.

Dessa forma, este estudo contribui com um método de ACCV capaz de considerar simultaneamente o desempenho funcional, estrutural e de resistência à derrapagem no processo de tomada de decisão para definição de estratégias de M&R. Adicionalmente, ao incorporar custos e impactos ambientais, o método integra ACCV e ACV, ampliando o escopo das análises tradicionais e contribuindo para uma gestão aeroportuária mais segura, resiliente e economicamente sustentável.

## 1.2 Problema de pesquisa

Para obter segurança operacional de pousos e decolagens, o pavimento aeroportuário deve ser mantido adequadamente ao longo de sua vida útil. Uma condição inadequada do pavimento pode resultar em aumento de custos operacionais e ambientais, além de contribuir para a ocorrência de acidentes e incidentes, com prejuízos materiais e perdas de vidas humanas.

Entretanto, é frequente a ausência de um planejamento estratégico, sobretudo em países em desenvolvimento, como o Brasil, por parte dos agentes envolvidos, que considere o desempenho funcional, estrutural e de resistência à derrapagem dos pavimentos durante o seu ciclo de vida, além dos impactos ambientais e os recursos financeiros dispensados a longo prazo. Essa lacuna no planejamento compromete a segurança operacional e a eficiência econômica e ambiental dos aeroportos. Diante desse contexto, como estruturar um método

integrado de ACCV e ACV, aplicável à realidade brasileira, e incorporar além do desempenho funcional, o desempenho estrutural e a segurança operacional ao longo do ciclo de vida do pavimento, de modo a apoiar a tomada de decisão da autoridade de aviação civil e dos operadores de aeródromos?

### 1.3 Justificativa

As infraestruturas aeroportuárias, direta ou indiretamente, causam impactos econômicos, ambientais e sociais. Além disso, essas infraestruturas, se mal geridas, podem se tornar fatores contribuintes para a ocorrência de acidentes e incidentes com aeronaves em solo. Sendo assim, é recomendado que os operadores de aeródromos revisem esses parâmetros na fase de planejamento da construção e das atividades de M&R. A introdução de uma ferramenta que permita considerar os custos ao longo do tempo, considerando critérios de sustentabilidade e critérios econômicos, para o gerenciamento de pavimentos aeroportuários, pode ser adequada (Alaloul *et al.*, 2021).

Portanto, é pertinente a realização de uma análise econômica (ACCV) e ambiental (ACV) que considere o desempenho dos pavimentos aeroportuários brasileiros, assim como os recursos financeiros dispensados ao longo do seu ciclo de vida, seja em atividades de construção ou de M&R. Com isso, busca-se garantir o nível de serviço esperado do pavimento durante a sua vida útil, a segurança operacional e a gestão eficaz dos recursos disponíveis (Carneiro *et al.*, 2023). A implementação dessa abordagem holística pode resultar em uma infraestrutura mais sustentável, operacionalmente segura e economicamente viável, atendendo às demandas de longo prazo do setor aeroportuário.

### 1.4 Objetivos

Esta pesquisa tem como objetivo geral desenvolver um método integrado de Análise de Custo do Ciclo de Vida (ACCV) e Análise de Ciclo de Vida (ACV) para pavimentos aeroportuários brasileiros, que considere os aspectos funcionais, estruturais e de resistência à derrapagem, para definição de estratégias de manutenção e reabilitação (M&R).

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- a) Caracterizar diferentes indicadores de desempenho funcional, estrutural e de resistência à derrapagem de pavimentos aeroportuários;

- b) Desenvolver modelos de previsão de desempenho de pavimentos aeroportuários brasileiros usando parâmetros funcionais e de resistência à derrapagem;
- c) Propor um método para realizar a ACCV de pavimentos aeroportuários brasileiros;
- d) Realizar uma ACV para a proposição de um método para calcular os custos ambientais, visando à integração na ACCV de pavimentos aeroportuários brasileiros;
- e) Avaliar diferentes alternativas e cenários de M&R em pavimentos aeroportuários brasileiros por meio da ACCV e ACV usando parâmetros funcionais, estruturais e de resistência à derrapagem.

### 1.5 Premissas utilizadas no método

Para a proposição do método utilizado nesta pesquisa foram utilizadas algumas premissas iniciais como:

- Preço fixo do CO<sub>2e</sub> de US\$ 61,03 (Sistema de Comércio de Emissões da União Europeia);
- Espessuras mínimas construtivas para as camadas do pavimento nos serviços de reconstrução;
- ACV em *cradle to construction*, ou seja, desde a extração da matéria-prima até a construção.

### 1.6 Estrutura do trabalho

A Tese é composta por cinco capítulos. Além deste capítulo introdutório, o segundo capítulo apresenta uma revisão da literatura sobre os assuntos necessários para realização desta pesquisa, sendo os principais: sistemas de gerência de pavimentos aeroportuários, avaliação, manutenção e reabilitação de pavimentos aeroportuários, utilização de redes neurais artificiais para construção de modelos de previsão de desempenho, ACCV e ACV. O terceiro capítulo descreve o método de pesquisa, que apresenta a ferramenta desenvolvida neste estudo e os materiais utilizados para desenvolvê-la. O quarto capítulo apresenta a análise e a discussão dos resultados, enquanto o quinto capítulo mostra as conclusões e limitações da pesquisa, além de sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo apresenta-se uma revisão de literatura sobre Sistema de Gerência de Pavimentos Aeroportuários (SGPA), Avaliação de Pavimentos Aeroportuários, Manutenção e Reabilitação de Pavimentos Aeroportuários (M&R), Utilização de Redes Neurais Artificiais em Modelos de Previsão de Desempenho de Pavimentos Aeroportuários, Análise de Custo de Ciclo de Vida e Análise de Ciclo de Vida do Pavimento, mostrando os principais estudos sobre essas temáticas.

### 2.1 Considerações sobre os Sistemas de Gerência de Pavimentos Aeroportuários (SGPA)

O operador de aeródromo deve formular e implementar um sistema de manutenção de toda a infraestrutura aeroportuária. Este deve ser capaz de manter as condições físicas e operacionais dentro dos padrões exigidos. Sendo assim, os operadores de aeródromo em que o número de passageiros processados seja igual ou superior a cinco milhões devem estabelecer um Sistema de Gerência de Pavimentos Aeroportuários (SGPA). Para os aeródromos de menor porte, recomenda-se a implementação desse sistema (ANAC, 2023a).

Um SGPA consiste em um conjunto de métodos e ferramentas para auxiliar os gestores e tomadores de decisões a estabelecerem estratégias otimizadas para construir, avaliar e manter os pavimentos em uma condição funcional aceitável, durante sua vida útil. Um dos objetivos de um SGPA é a melhoria contínua do nível de serviço e da segurança operacional, a partir do gerenciamento eficaz dos recursos disponíveis (ANAC, 2017). A implementação de um SGPA inclui as seguintes atividades: (i) obter o financiamento adequado, por parte do operador do aeródromo, para estabelecer o SGPA; (ii) identificar potenciais usuários do sistema e determinar suas necessidades; (iii) decidir quem irá desenvolver e operar o sistema (pessoal interno, consultor ou uma combinação dos dois); (iv) selecionar ou desenvolver o *software* do SGPA; (v) criar um banco de dados incluindo o seccionamento da rede e a avaliação inicial da condição do pavimento e (vi) incluir no *software* as taxas de deterioração do pavimento, políticas de M&R e os custos unitários típicos das atividades de M&R, bem como o método para priorização de projetos (Hein e Aho, 2011).

Assim, a primeira e mais básica função de um SGPA é fornecer um inventário completo e estruturado da rede de pavimentos. Para isso, deve-se dividi-la em grupos denominados seções, que representam a menor fração da rede para as quais as decisões de M&R são tomadas.

Cada seção (pista de pouso e decolagem, pátio de estacionamento e pista de taxiamento) deve apresentar características como a estrutura do pavimento, o histórico de construção e M&R, o volume de tráfego e *mix* de aeronaves e as condições funcional e estrutural, além do número de identificação e da área de cada seção (Gendreau e Soriano, 1998).

Em relação ao levantamento das condições da infraestrutura aeroportuária, a avaliação do pavimento envolve quatro componentes principais: as condições de superfície, a resistência, a irregularidade e a resistência à derrapagem. A maioria das agências de aviação utiliza o *Pavement Condition Index* (PCI) para a avaliação funcional do pavimento aeroportuário (Tighe e Covalt, 2008). Em relação às condições de resistência à derrapagem, os indicadores mais utilizados são o coeficiente de atrito e a macrotextura (Maia *et al.*, 2023). No projeto estrutural, um parâmetro que deve ser observado é o *Cumulative Damage Factor* (CDF). Esses índices serão discutidos neste capítulo posteriormente de forma detalhada.

O desenvolvimento do banco de dados de um SGPA consiste em inserir as informações coletadas das seções do pavimento em um arquivo de banco de dados. Isso inclui todas as informações que foram coletadas durante o processo de avaliação do pavimento e o inventário da rede. Esse banco de dados deve ser atualizado periodicamente (Tighe e Covalt, 2008; Qabaja e Labeedi, 2020). Vários estudos com a utilização de Sistema de Informação Geográfica (SIG) e Sistema de Posicionamento Global (GPS) foram desenvolvidos, para aplicação em banco de dados de SGPA (Huang *et al.*, 2004; Zhiren e Xianghua, 2009; Chen *et al.*, 2012). O uso dessas ferramentas pode otimizar o processo de gerenciamento do pavimento, tornando-o mais rápido.

Os SGPA tornaram-se cada vez mais dependentes das estimativas de vida útil do pavimento para definir estratégias de M&R. Assim, modelos de previsão de desempenho podem ser utilizados, por exemplo, para realizar Análise de Custo de Ciclo de Vida (ACCV), com o objetivo de determinar o tempo ideal e qual a condição do pavimento na qual se deve executar uma atividade de manutenção ou reabilitação (Gendreau e Soriano, 1998).

Diferentes técnicas podem ser utilizadas para criação desses modelos, como o uso de Inteligência Artificial (IA), com Redes Neurais Artificiais (RNA). Um exemplo é o estudo de Quariguasi, Oliveira e Reis (2021), que utilizou RNA para criar um modelo de previsão do coeficiente de atrito usando dados de uma PPD brasileira, obtendo resultados adequados ( $R^2 = 0,775$ ).

Um SGPA também permite identificar os custos e benefícios de diferentes estratégias de M&R, tornando a tomada de decisão mais eficiente, uma vez que é possível compreender os efeitos de longo prazo, por meio dos modelos de previsão, e assim decidir sobre a priorização de projetos (Qabaja e Labeedi, 2020). A ACCV é amplamente utilizada em SGPA para

selecionar as melhores alternativas de M&R e o momento ideal para sua implementação, enquanto o método mais conhecido para medir a eficiência da ação é a Análise de Custo/Benefício (ACB) (Tofail *et al.*, 2020).

A aplicação de um SGPA pode ser feita de duas formas: em nível de rede ou em nível de projeto. O gerenciamento em nível de rede considera um programa geral de projetos de construções, manutenções ou reabilitações, que terão o maior custo-benefício para o período de análise, para todos os pavimentos constituintes de um determinado SGPA. Por outro lado, a gerência em nível de projeto considera as atividades detalhadas do próprio projeto e execução de obras em um trecho específico da malha aeroportuária. Essas atividades devem confirmar e especificar as recomendações da gerência em nível de rede e subsidiar os orçamentos e programas de curto prazo (Oliveira, 2009)

Assim, a gerência em nível de rede tem o objetivo de decidir, em um determinado momento, quais seções do pavimento devem receber atividades de manutenção ou reabilitação. A gerência em nível de projeto deve conceber e implementar os projetos para as atividades de M&R que devem ser realizados nas seções previamente selecionadas (Hein e Aho, 2011).

Vários estudos na literatura que fornecem informações úteis sobre métodos de gerenciamento de pavimentos. Esses estudos incluem a avaliação da condição do pavimento, seleção de atividades de M&R, análise de prioridade de projetos e outros tópicos de gerenciamento de pavimentos (Tabela 1).

Tabela 1 - Estudos sobre SGPA.

Referência	Objetivo	Resultados
Rada <i>et al.</i> (1992)	Desenvolver e implementar um SGPA no Aeroporto Internacional John F. Kennedy, nos Estados Unidos, descrevendo seus componentes básicos e as etapas envolvidas na implementação.	O SGPA oferece muitos benefícios, como: armazenamento ordenado, organizado e permanente de todos os dados atuais e futuros do pavimento; fácil acesso a esses dados, além de ferramentas de análise e previsão de desempenho; maior eficiência durante o processo de tomada de decisão; melhor programação das atividades de M&R e economias substanciais nos custos das atividades de M&R.

Tabela 1 - Continuação...Estudos sobre SGPA.

Referência	Objetivo	Resultados
<b>Gendreau e Soriano (1998)</b>	Descrever os principais elementos do SGPA e revisar os sistemas existentes.	A variedade de métodos implementados em sistemas de gerência de pavimentos rodoviários é maior do que aqueles encontrados para pavimentos aeroportuários, no qual o <i>Pavement Maintenance Management System</i> (PAVER), é o método mais utilizado. Modelos Markovianos, adotados em pavimentos rodoviários, poderiam ser bem aplicados em SGPA.
<b>Huang et al. (2004)</b>	Implementar um SGPA baseado em SIG e GPS para um aeroporto internacional em Singapura.	A utilização das ferramentas oferece uma série de benefícios, como a capacidade de interagir com outros SGPA e realizar levantamentos de campo mais eficientes e com dados confiáveis em relação a identificação e localização das áreas que necessitam de manutenção.
<b>Zhiren e Xianghua (2009)</b>	Desenvolver um SGPA baseado em SIG e MapX para um aeroporto na província de Hunan, na China.	O SGPA desenvolvido tem um custo relativamente baixo. A aplicação do <i>software</i> é capaz de oferecer uma base confiável e melhorar o gerenciamento dos aeroportos pequenos e médios.
<b>Chen et al. (2012)</b>	Analisar o SGPA do aeroporto de Xangai, que utiliza SIG e GPS para coleta e armazenamento de dados, análise geoespacial da avaliação do pavimento e otimização do planejamento de manutenção.	O tempo de inspeção do pavimento foi reduzido consideravelmente com o uso das ferramentas.
<b>Irfan et al. (2015)</b>	Realizar um estudo de caso utilizando ACCV e o índice de custo-efetividade, mostrando um passo a passo do procedimento para implementação em um SGPA em países em desenvolvimento.	O método utilizado fornece procedimentos sistemáticos e objetivos para manter o inventário do pavimento, monitorar o seu desempenho, selecionar a atividade de M&R e seu tempo ideal de aplicação.
<b>Tofail et al. (2020)</b>	Realizar uma revisão da literatura sobre os SGPA, visando identificar os componentes, os índices, os <i>softwares</i> utilizados e o processo de implementação.	Destacou os benefícios de um SGPA em fornecer aos operadores aeroportuários uma ferramenta de auxílio à tomada de decisões. Com isso, é possível prever os requisitos futuros de manutenção e programar a M&R de forma adequada e oportuna.

Tabela 1 - Continuação...Estudos sobre SGPA.

Referência	Objetivo	Resultados
<b>Qabaja e Labeedi (2020)</b>	Realizar uma revisão de literatura sobre os SGPA.	Mostraram os principais elementos que constituem os SGPA, cálculo de custos, principais tipos de defeitos em pavimentos asfálticos e de concreto, assim como os principais <i>softwares</i> utilizados, como o PAVER. Importância de usar modelos para prever o desempenho do pavimento, de modo a estimar a sua vida útil.
<b>Di Graziano <i>et al.</i> (2021)</b>	Analisar um SGPA durante a fase de implementação e realizar um estudo de caso no aeroporto de Catania, na Itália	O uso de um SGPA é importante desde a primeira fase de implementação, pois permite simplificar e racionalizar alguns processos. Devem ser realizadas investigações minuciosas sobre o estado de conservação do pavimento, para melhor desenvolvimento dos modelos de previsão de desempenho.
<b>Di Mascio <i>et al.</i> (2021)</b>	Realizar um estudo de caso no aeroporto de Cagliari, na Itália, para analisar a implementação de um SGPA.	Foram utilizados o PCI, o <i>International Roughness Index</i> (IRI) e a Profundidade Média do Perfil para os anos de 2016 e 2019, para avaliar a condição do pavimento e obter suas taxas de deterioração. Verificaram uma tendência de diminuição natural no valor do PCI entre os anos de 2016 e 2019.
<b>Di Graziano <i>et al.</i> (2024)</b>	Analisar o uso do BIM em SGPA, como uma ferramenta analítica para visualizar e monitorar a evolução do desempenho do pavimento das infraestruturas aeroportuárias.	O uso do BIM facilita o planejamento das atividades de manutenção, simplifica o acesso às informações do SGPA e a verificação de possíveis interferências com os ativos existentes, como serviços subterrâneos, que poderiam afetar as fases e os prazos de construção.

Os estudos sobre SGPA mostram uma evolução na tecnologia e nos métodos aplicados para a manutenção e gerenciamento de pavimentos aeroportuários. As pesquisas destacam a importância do armazenamento organizado de dados e a eficiência na tomada de decisões, até o uso de tecnologias como SIG, BIM e GPS para melhorias na coleta e análise de dados. A adoção de SGPA não só melhora a eficiência operacional e reduz os custos de M&R, mas também aumenta a segurança e a duração do ciclo de vida dos pavimentos aeroportuários, evidenciando sua importância para aeroportos de todos os portes.

## 2.2 Avaliação da Condição do Pavimento Aeroportuário

A degradação do pavimento aeroportuário ocorre de forma gradual, com o acúmulo de defeitos ao longo do tempo. Devido a diversos fatores, como tráfego, clima, capacidade de suporte do subleito, entre outros, as condições de superfície do pavimento podem variar de excelente a péssimo ao longo de seu ciclo de vida, podendo chegar à condição de ruptura. Sendo assim, o pavimento precisa de intervenções de manutenção e reabilitação (M&R) com uma determinada periodicidade (Macedo, 2005).

Nesse contexto, é dever do operador aeroportuário estabelecer e documentar os requisitos e procedimentos para avaliação do estado do pavimento, a fim de manter as condições estruturais, funcionais e de segurança em níveis adequados (ANAC, 2023a). A avaliação de um pavimento objetiva obter informações para auxiliar a tomada de decisões relativas às atividades de M&R. Para isso, deve-se determinar os seguintes parâmetros: (i) necessidades atuais e futuras de manutenção dos pavimentos; (ii) vida útil restante dos pavimentos; (iii) índices de condição dos pavimentos (Perroni e Lima, 2019).

A condição estrutural do pavimento aeroportuário é composta pela sua integridade estrutural e capacidade estrutural. A integridade estrutural se relaciona com a maior ou menor ocorrência de descontinuidades como trincas e desagregações em camadas asfálticas e cimentadas, enquanto a capacidade estrutural é a capacidade que as camadas do pavimento possuem de resistir aos efeitos do tráfego de aeronaves (ANAC, 2017).

A integridade estrutural pode ser medida por meio de avaliação visual, com o registro da extensão, frequência e severidade dos defeitos de superfície. Ela pode ser complementada por resultados de ensaios não destrutivos, que permitam, por exemplo, a detecção do módulo de elasticidade *in situ*, usando equipamentos com o *Heavy Weight Deflectometer* (HWD). A capacidade estrutural está relacionada ao comportamento tensão-deformação dos materiais (comportamento resiliente), à resistência dos materiais contra o acúmulo de deformações plásticas e à resistência ao trincamento por fadiga das camadas asfálticas e cimentadas (ANAC, 2017).

Em projetos estruturais de pavimentos aeroportuários é considerada toda a mistura de aeronaves em operação no aeroporto. Isso aplica a hipótese de que a falha estrutural ocorre devido ao acúmulo de danos causados em cada operação de pouso ou decolagem ao longo da vida útil projetada. O *Cumulative Damage Factor* (CDF) é a quantidade de fadiga estrutural que um pavimento em uso pode suportar e que já foi consumida. O CDF para aeronaves é um

valor entre 0 e 1, que indica a contribuição para a falha do pavimento a partir do número de movimentos projetados para cada tipo de aeronave que utiliza o pavimento. A análise do CDF pode, então, estimar a vida útil restante do pavimento da pista (Santilli e Correia, 2024).

A avaliação da condição funcional do pavimento aeroportuário objetiva verificar se ele cumpre duas funções básicas, fornecer conforto ao rolamento e garantir a segurança (ANAC, 2017). Ela relaciona-se aos aspectos que afetam diretamente o usuário e os custos do transporte, como custos operacionais dos veículos, custo do tempo de viagem e custo de acidentes (Perroni e Lima, 2019).

A avaliação funcional avalia parâmetros referentes à irregularidade longitudinal e defeitos no pavimento. Ainda devem ser observadas as condições de resistência à derrapagem, que estão relacionadas à segurança das operações de pouso e decolagem. Ela pode ser medida por meio do coeficiente de atrito e da profundidade da macrotextura. As condições estruturais, de resistência à derrapagem e funcionais são essenciais à garantia da segurança operacional nos aeroportos, independentemente do tamanho, da estrutura e da complexidade de funcionamento (Oliveira, 2016).

ANAC (2023a) estabelece requisitos e recomendações quanto às avaliações de irregularidade longitudinal, atrito e macrotextura e recomenda a utilização de um índice de serventia para avaliar os defeitos no pavimento. No entanto, não especifica qual deve ser esse índice. Nesse sentido, para avaliação da condição funcional do pavimento quanto aos defeitos, a ANAC (2020a) sugere que o operador de aeródromo utilize o *Pavement Condition Index* (PCI) estabelecido por ASTM (2020).

De Moura *et al.* (2021) realizaram uma revisão sistemática da literatura sobre os sistemas e modelos de avaliação das condições dos pavimentos aeroportuários. O estudo teve objetivo de direcionar a tomada de decisão quanto às ações de M&R de pavimentos aeroportuários. Como resultado, os autores conseguiram identificar 15 métodos diferentes para previsão das condições do pavimento. Nesta pesquisa, serão estudados quatro índices de avaliação funcional, estrutural e de resistência à derrapagem do pavimento: o PCI, o coeficiente de atrito, a macrotextura e o CDF.

### **2.2.1 *Pavement Condition Index* (PCI)**

O *Pavement Condition Index* (PCI) foi desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército Americano (USACE) em 1989 e o seu uso em pavimentos aeroportuários, rodoviários e estacionamentos foi amplamente aceito, sendo formalmente adotado como procedimento

padrão por muitas agências em todo o mundo (Shahin, 1994). Entre os órgãos que utilizam o PCI estão a *Federal Aviation Administration* (FAA) e a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC).

O PCI é normatizado por ASTM (2020) e indica um índice numérico que varia de 0, para a ruptura do pavimento, a 100, correspondente a um pavimento excelente (Figura 1). O cálculo do PCI é baseado nos resultados de um levantamento visual da condição do pavimento em que o tipo, a gravidade e a quantidade de defeitos são identificadas (Shahin, 1994).

Figura 1 - Parâmetros do PCI do pavimento.

PCI	Escala
85 à 100	Excelente
70 à 84	Bom
55 à 69	Regular
40 à 54	Ruim
25 à 39	Muito Ruim
10 à 24	Péssimo
0 à 09	Ruptura

Fonte: ANAC (2017).

O método consiste em caracterizar as seções da rede de pavimentos. Cada seção deve ser dividida em unidades amostrais de tamanho padrão. Para isso devem ser utilizadas técnicas de amostragem aleatória. Para compensar pontos não-representativos e unidades amostrais que contenham algum defeito incomum, deverão ser selecionadas unidades amostrais adicionais (ANAC, 2017). ASTM (2020) define o tamanho da unidade amostral para os pavimentos aeroportuários da seguinte forma:

- a) Pavimento rígido: 20 placas de concreto contíguas (+/- 8 se o número total não for divisível por 20, ou para acomodar condições de campo específicas);
- b) Pavimento flexível: 450 m<sup>2</sup> contíguas (+/- 180 m<sup>2</sup> se a seção do pavimento não for divisível por 450 m<sup>2</sup>, ou para acomodar condições de campo específicas).

Para o cálculo do PCI são utilizados valores deduzidos, que variam de 0 a 100 e indicam o impacto dos defeitos na condição do pavimento. Valores deduzidos iguais a 0 indicam defeitos que não afetam o desempenho do pavimento, enquanto valores deduzidos iguais a 100 indicam defeitos excessivamente graves. Para quantificá-los é utilizada a densidade da área afetada. Para cada defeito e sua severidade associada à densidade, existe um gráfico que mostra os valores deduzidos, os quais devem ser somados para obter o Valor Deduzido Total (VDT)

(ANAC, 2017). Os valores deduzidos superiores a 5 devem ser ajustados por meio de um gráfico específico de Valor Deduzido Corrigido (VDC) (ASTM, 2020).

ANAC (2017) sugere que o valor de PCI crítico para manutenção do pavimento aeroportuário é igual a 70 e o PCI crítico de serviço é igual a 40. O PCI crítico de manutenção significa que, a partir deste nível, a condição do pavimento piora significativamente ao longo do tempo, caracterizando um ponto ótimo para execução de uma reabilitação. O PCI crítico de serviço é aquele em que o pavimento já possui uma condição ruim, que pode comprometer a sua função e aumentar o risco às operações aeroportuárias. ANAC (2017) sugere, ainda, a frequência de levantamento do PCI conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Frequência de medição do PCI.

Elemento	Classe I – B		Classe II		Classe III		Classe IV	
	PPD	Táxi e Pátio	PPD	Táxi e Pátio	PPD	Táxi e Pátio	PPD	Táxi e Pátio
Frequência (em meses)	24	48	24	48	18	36	12	24
Frequência (em anos)	2	4	2	4	1,5	3	1	2

Fonte: Adaptado de ANAC, 2017.

A Tabela 3 apresenta alguns estudos que utilizaram o PCI para avaliação da condição do pavimento.

Tabela 3 - Estudos que usaram o PCI para avaliar a condição do pavimento.

Referência	Objetivo	Método	Resultados
Shahnazari <i>et al.</i> (2012)	Desenvolver uma abordagem alternativa para previsão do PCI utilizando técnicas de otimização incluindo Redes Neurais Artificiais (RNA) e Programação Genética (PG)	Foi utilizado um banco de dados de PCI de mais de 1.250 km de rodovias no Irã. As variáveis de entrada foram trincas couro de jacaré, fissuras, trincas em blocos, trincas de bordas, trincas longitudinais, remendos e buracos e trincas transversais.	O modelo baseado em RNA foi mais preciso que o modelo baseado em PG.
Elhadidy <i>et al.</i> (2019)	Desenvolver um modelo de regressão simplificado entre o <i>International Roughness Index</i> (IRI) e o PCI	Usaram dados de séries históricas de rodovias.	A relação entre o IRI e o PCI é melhor representada por uma função sigmoide. Foi obtido um R <sup>2</sup> de 0,995.

Tabela 3 - Continuação...Estudos que utilizaram o PCI para avaliar a condição do pavimento.

Referência	Objetivo	Método	Resultados
Santos <i>et al.</i> (2020)	Propor um método indireto para obtenção do PCI.	Usaram um veículo equipado com obtenção de imagens, <i>lasers</i> e GPS no aeroporto internacional Amílcar Cabral, em Cabo Verde. Realizou-se uma comparação estatística entre o PCI obtido pela inspeção tradicional (a pé) e o método proposto.	Não foram encontradas diferenças estatisticamente significativas nos resultados. O tempo de inspeção e o custo pode ser reduzido usando o método indireto.
Sidess <i>et al.</i> (2020)	Desenvolver um modelo de deterioração do PCI baseado em uma combinação das abordagens empírico-mecanicista e empírica regressiva.	Foram utilizadas como variáveis de entrada o módulo do subleito, o número estrutural do pavimento, a espessura da camada asfáltica e as zonas climáticas Norte, Centro e Sul de Israel.	Os resultados previstos pelo modelo foram comparados com resultados de campo e obtiveram uma boa correlação.
Wesołowski e Iwanowski (2020)	Desenvolver um método de avaliação da condição do pavimento baseado no PCI, aplicado ao pavimento aeroportuário, e denominado de <i>Airfield Pavement Condition Index</i> (APCI).	O método leva em consideração dados de manutenções, capacidade de carga, irregularidade, textura, uniformidade e resistência à tração superficial.	Observaram uma automação significativa do processo de avaliação dos pavimentos, ao mesmo tempo que reduziu a influência do fator humano nos resultados da análise, melhorando a segurança das operações.
Almeida e Oliveira (2022)	Verificar a existência de autocorrelação espacial do PCI de pavimentos aeroportuários, por meio do I de Moran.	Utilizaram dados de defeitos e do PCI calculado na PPD de um aeroporto brasileiro, no ano de 2018. A variável explicativa do PCI foi o afundamento de trilha de roda com baixa severidade.	O modelo de regressão obteve um $R^2$ de 0,71. Os modelos espaciais foram significativos. A regressão linear é mais eficiente na estimativa do PCI. No entanto, a estatística espacial pode ser utilizada para compreensão espacial das informações.

Tabela 3 - Continuação...Estudos que utilizaram o PCI para avaliar a condição do pavimento.

Referência	Objetivo	Método	Resultados
<b>Ghanim et al. (2022)</b>	Desenvolver um modelo simples e adaptativo para prever o PCI a partir do tipo e gravidade dos defeitos no pavimento.	Foram utilizadas Redes Neurais Artificiais (RNA) para prever os valores de PCI das seções. Foram analisados 348 trechos de 10 estradas na cidade de Nablus, na Palestina.	O uso de RNA reduziu os esforços necessários para estimar o PCI e permitiu a introdução de novas variáveis, como a presença de bueiros em trechos específicos da rede. Baixa correlação entre os defeitos e o PCI. O modelo obteve um $R^2$ de 0,9975.
<b>Maia et al. (2022)</b>	Analisar a condição do pavimento da PPD de oito aeroportos brasileiros.	O PCI foi comparado com a percepção dos pilotos de aeronaves em relação ao conforto nas operações de pouso.	A relação entre o PCI e nota dos pilotos resultou em um $R^2$ superior a 0,80. O PCI é um indicador adequado para avaliar o conforto dos pilotos durante operações de pouso.
<b>Oliveira et al. (2023)</b>	Realizar uma análise estatística para verificar a correlação entre o PCI, o coeficiente de atrito e a macrotextura.	Foram utilizados dados de 2018 de uma PPD brasileira.	O estudo mostrou uma baixa correlação entre as variáveis, evidenciando a importância de realizar ambos os levantamentos para planejar a manutenção dos pavimentos aeroportuários.
<b>Barcelos (2025)</b>	Propor soluções de M&R para o pavimento do Aeroporto de Joinville, utilizando como base o PCI.	Os dados foram obtidos por escaneamento com veículo equipado com perfilômetro a laser e videomonitoramento georreferenciado, sendo posteriormente analisados para cálculo do PCI.	Recomendou-se selagem em trincas leves, tratamento superficial em trechos com desgaste, e reconstrução nos casos de defeitos críticos.

Os estudos analisados sobre métodos de previsão e avaliação do PCI (Tabela 3) demonstram a diversidade e a sofisticação das abordagens desenvolvidas nos últimos anos. Técnicas avançadas, como Redes Neurais Artificiais (RNA) têm sido aplicadas para aumentar a precisão na previsão do PCI. Além disso, a automação e a redução da influência humana melhoram a eficiência e a segurança das avaliações de pavimentos. Os estudos reforçam a aplicabilidade e a relevância do PCI como um indicador robusto e adaptável para avaliar a condição dos pavimentos aeroportuários.

### 2.2.2 Condições de Resistência à Derrapagem

Os pavimentos tendem a se tornar escorregadios quando estão molhados, cobertos de neve, lama ou gelo. Entretanto, a compreensão plena dos efeitos físicos responsáveis pelo escorregamento, que por sua vez podem causar incidentes e acidentes, ainda é pouco conhecida. A partir da década de 1950 surgiram preocupações acerca da aderência entre o pneu e o pavimento no contexto aeroportuário, sobretudo devido ao aumento no desenvolvimento de aeronaves mais modernas e que necessitavam de pistas mais seguras para as suas operações (Oliveira, 2016).

A aderência entre o pneu e o pavimento proporciona a resistência à derrapagem. Essa resistência se deteriora com o tempo devido a uma série de fatores, sendo os principais o desgaste mecânico e o polimento dos agregados devido a ação dos pneus da aeronave no revestimento e o acúmulo de contaminantes, como borracha, na superfície do pavimento. O efeito desses fatores depende do volume e do tipo de tráfego de aeronaves (FAA, 2014).

Outros fatores que influenciam na taxa de deterioração da resistência à derrapagem incluem mas não se limitam às condições climáticas locais, o tipo de pavimento utilizado (Concreto Asfáltico ou Concreto de Cimento Portland), os materiais originais utilizados na construção, qualquer atividade de reabilitação posterior, condições de drenagem e práticas de manutenção aeroportuária (FAA, 2014).

O operador de aeródromo deve manter a pista de pouso e decolagem (PPD) em condições operacionais adequadas de modo a garantir a resistência à derrapagem, o controle direcional das aeronaves e a integridade dos equipamentos aeronáuticos. No que diz respeito à essa resistência, os parâmetros que devem ser observados são o coeficiente de atrito, a profundidade da macrotextura e o acúmulo de borracha (ANAC, 2023a).

O atrito pode ser descrito como uma força tangencial resistente, atuante na interface entre dois corpos, resultante da ação de uma força externa de um corpo que se move ou tende a se mover sobre o outro. Na presença de água, podem ocorrer pressões hidrodinâmicas, que fazem os pneus da aeronave deslizarem sem contato direto com o pavimento, provocando a perda de controle direcional. Esse fenômeno é conhecido como hidroplanagem (Aps, 2006).

A resistência à derrapagem é um problema crítico de segurança em pavimentos aeroportuários, devendo ser medida regularmente, principalmente em presença de água (Oliveira, 2016). A medição do coeficiente de atrito da PPD deve ser realizada com frequência definida em ANAC (2023a). Por sua vez, ANAC (2023b) estabelece que o valor do coeficiente

de atrito da PPD deve ser igual ou superior aos parâmetros estabelecidos na Tabela 4, em função do tipo de equipamento de medição e condições de ensaio. Admite-se uma tolerância de 2,5% sobre os valores do coeficiente de atrito.

Tabela 4 - Parâmetros de coeficiente de atrito por tipo de equipamento de medição.

Equipamento	Pneu Tipo	Pressão (kPa)	Velocidade do ensaio (km/h)	Profundidade da lâmina d'água simulada (mm)	Coeficiente de atrito	
					Nível de manutenção	Nível mínimo
<i>Mu-meter</i>	A	70	65	1,0	0,52	0,42
	A	70	95	1,0	0,38	0,26
<i>Skiddometer</i>	B	210	65	1,0	0,60	0,50
	B	210	95	1,0	0,47	0,34
<i>Grip tester</i>	C	140	65	1,0	0,53	0,43
	C	140	95	1,0	0,36	0,24

Fonte: Adaptado de ANAC (2023b).

O coeficiente de atrito deve ser medido a uma distância especificada em ANAC (2023b) em relação ao eixo da PPD. Essa distância está relacionada ao código do aeródromo definido para fins de planejamento e pode ser verificado em ANAC (2023a). Assim, os valores referentes às distâncias a serem medidas estão expressos na Tabela 5.

Tabela 5 - Localização das medições de atrito.

Letra do Código	Localização da medição	Quantidade Mínima
<b>A, B ou C</b>	A 3m do eixo da pista	Uma vez de cada lado em relação ao eixo da pista
<b>D, E ou F</b>	A 3m e 6m do eixo da pista	Uma vez de cada lado em relação ao eixo da pista, para cada distância da coluna

Fonte: ANAC (2023b).

No que diz respeito à macrotextura, ela é uma das formas de caracterizar a textura superficial de um pavimento. É influenciada pelo tipo de mistura asfáltica utilizada e, principalmente, pelos agregados que a constituem (Silva, 2008). A macrotextura influencia na hidroplanagem, pois o volume de precipitação para que o fenômeno ocorra é maior em superfícies com texturas mais abertas, já que favorecem a drenagem da água (Rodrigues Filho, 2006).

Portanto, a macrotextura influencia nas condições de resistência à derrapagem em PPD e na segurança das operações de pouso e decolagem, devendo ser medida periodicamente. A forma mais simples de medição é o ensaio de mancha de areia. Esse ensaio consiste no espalhamento uniforme de um volume conhecido de areia sobre uma área da superfície do pavimento e na determinação da profundidade média da macrotextura mediante a divisão do

volume de areia utilizado pela área de espalhamento. A profundidade média da macrotextura para a PPD deve ser de no mínimo 0,60 mm (ANAC, 2023b). A ANAC (2023a) estabelece a frequência mínima de medição da macrotextura e o operador de aeródromo deve calcular a profundidade média da macrotextura de cada terço da pista e classificá-la conforme a Tabela 6.

Tabela 6 - Classificação da macrotextura.

<b>Profundidade – P (mm)</b>	<b>Classificação</b>
<b><math>P \leq 0,2</math></b>	Muito fechada
<b><math>0,2 \leq P \leq 0,4</math></b>	Fechada
<b><math>0,4 &lt; P \leq 0,8</math></b>	Média
<b><math>0,8 &lt; P \leq 1,2</math></b>	Aberta
<b><math>P &gt; 1,2</math></b>	Muito Aberta

Fonte: ANAC (2023a)

Para a remoção do acúmulo de borracha, a ANAC (2023a) estabelece que o acúmulo de borracha na PPD deve ser removido quando este afetar as condições de resistência à derrapagem ou obedecer à frequência mínima estabelecida na Tabela 7.

Tabela 7 - Frequência mínima de remoção de borracha.

<b>Faixas</b>	<b>Média de pousos diários de aeronaves de asa fixa com motor à reação, na cabeceira predominante, no último ano</b>	<b>Frequência de remoção de borracha</b>
<b>1</b>	Menor que 16	Cada 720 dias
<b>2</b>	Maior ou igual a 16 e menor que 31	Cada 360 dias
<b>3</b>	Maior ou igual a 31 e menor que 91	Cada 180 dias
<b>4</b>	Maior ou igual a 91 e menor que 151	Cada 120 dias
<b>5</b>	Maior ou igual a 151 e menor que 210	Cada 90 dias
<b>6</b>	Maior que 210	Cada 60 dias

Fonte: ANAC (2023a).

A Tabela 8 apresenta alguns estudos da literatura sobre os parâmetros de resistência à derrapagem, especificamente o coeficiente de atrito e a macrotextura, aplicado a pavimentos aeroportuários.

Tabela 8 - Estudos sobre os parâmetros de resistência à derrapagem.

<b>Referência</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Resultados</b>
<b>Fwa et al. (1997)</b>	Desenvolver um modelo de apoio à tomada de decisão para o gerenciamento das condições de aderência no aeroporto de Singapura, objetivando otimizar as operações de remoção de borracha.	Foi desenvolvido um modelo de RNA para a remoção de borracha ( $R^2$ variando de 0,5 a 0,98) e um modelo de regressão para previsão do atrito ( $R^2 = 0,78$ ).

Tabela 8 - Continuação...Estudos sobre os parâmetros de resistência à derrapagem.

Referência	Objetivo	Resultados
<b>Gunaratne et al. (2000)</b>	Desenvolver correlações para prever a taxa de desgaste dos pneus e o atrito entre os pneus e os pavimentos de concreto liso com base em propriedades reais de textura. O estudo ilustra o cálculo do índice de desgaste para uma PPD na Base Aérea de Luke, no Arizona.	A microtextura afeta tanto o desgaste dos pneus quanto o atrito. As correlações desenvolvidas podem ser úteis para prever o índice de desgaste com base em ensaios convencionais atrito.
<b>Benedetto (2002)</b>	Propor um método de apoio à tomada de decisão para prever as condições da superfície de uma PPD durante fortes tempestades. Cria um modelo que identifica condições escorregadias e prevê o nível de aderência na pista.	As tempestades curtas são as mais críticas. A resistência à derrapagem aumenta com a macrotextura, embora a película de água seja mais profunda durante condições climáticas adversas. Pavimentos com textura aberta parecem ser a melhor solução para reduzir o risco de aquaplanagem e aumentar a confiabilidade de pouso e decolagem em condições ruins de tempo.
<b>Chen et al. (2008)</b>	Investigar o impacto do acúmulo de borracha nas condições de aderência, sobretudo no atrito, da PPD.	O acúmulo de borracha tem um forte impacto nas condições de aderência da PPD. Após o pouso de uma aeronave, observou-se um aumento na espessura do acúmulo de borracha de aproximadamente 0,05 µm.
<b>Lee et al. (2009)</b>	Propor uma nova metodologia para a identificação, medição e avaliação automática de ranhuras em PPD com <i>grooving</i> .	O método proposto utiliza dados de textura de alta resolução coletados por perfilômetros a laser, sendo mais robusto e preciso na identificação das ranhuras em comparação com o <i>software</i> ProGroove.
<b>Fuentes et al. (2012)</b>	Investigar a relação entre a macrotextura e o Índice Internacional de Fricção (IFI).	O conceito proposto no modelo IFI não é aplicável para níveis elevados de macrotextura. Um limite apropriado de macrotextura (1,5 mm) foi determinado para a aplicação confiável do modelo IFI.
<b>Wesolowski e Blacha (2019)</b>	Avaliar as propriedades de resistência à derrapagem de pavimentos aeroportuários. Os autores analisaram a textura do pavimento (microtextura e macrotextura) em relação à segurança das operações aéreas.	A textura do pavimento é essencial para a resistência à derrapagem. Os requisitos para pavimentos de aeroportos devem considerar a avaliação da textura para garantir o coeficiente de atrito adequado. Métodos de avaliação da textura são fundamentais para projetar pavimentos que melhorem a vida útil dos pneus sem comprometer a resistência à derrapagem.

Tabela 8 - Continuação...Estudos sobre os parâmetros de resistência à derrapagem.

Referência	Objetivo	Resultados
<b>Biancardo <i>et al.</i> (2020)</b>	Calibrar modelos específicos para examinar a evolução da deterioração do atrito em PPD em relação às cargas de tráfego usando dados do Aeroporto Internacional de Lamezia Terme.	Os modelos calibrados podem ser implementados em SGPA para prever a degradação do atrito em PPD ( $R^2$ acima de 0,9). É possível programar as atividades de manutenção necessárias para garantir a segurança das operações aéreas.
<b>Quariguasi, Oliveira e Reis (2021)</b>	Desenvolver um modelo de previsão do coeficiente de atrito medido em uma PPD brasileira, por meio de RNA.	Os resultados apresentaram um modelo viável com um $R^2$ de 77,5% para implementar e monitorar as condições de segurança operacional.
<b>Zieja <i>et al.</i> (2021)</b>	Analisar a textura de pavimentos novos de aeroportos em relação aos requisitos da FAA, ICAO e outras normas internacionais e propor um novo critério de textura com base em medições reais de campo.	Os resultados questionam a possibilidade de obter a profundidade média de textura atualmente exigida (1,00 mm) para novos pavimentos de aeroportos.
<b>Maia <i>et al.</i> (2023)</b>	Analisar as condições de resistência à derrapagem de PPD, antes e após processo de reabilitação, a fim de verificar o efeito dessa intervenção nos parâmetros de coeficiente de atrito e macrotextura	O coeficiente de atrito aumentou e a macrotextura não apresentou melhores condições pós-obra, mas estava em conformidade com a regulamentação. Identificou-se um comportamento cíclico no coeficiente de atrito e uma diminuição ao longo do tempo para a macrotextura.
<b>Fwa (2024)</b>	Revisar o estado da arte sobre a resistência à derrapagem de pavimentos aeroportuários, com foco no risco de excursões de pista, integrando novos métodos mecanicistas para modelar a interação pneu-fluido-pavimento, hidroplanagem e eficácia do <i>grooving</i> .	Métodos empíricos são limitados para avaliar resistência à derrapagem, enquanto a abordagem mecanicista permite modelar a interação pneu-fluido-pavimento e prever hidroplanagem com maior precisão. O <i>grooving</i> aumenta o atrito e reduz o risco operacional, sendo influenciado por fatores como textura, lâmina d'água, velocidade, pressão e carga do pneu.

Os estudos analisados na Tabela 8 destacam a importância de diferentes metodologias e abordagens para avaliar e prever a resistência à derrapagem dos pavimentos aeroportuários. A textura do pavimento, principalmente a macrotextura, mostrou ser um fator essencial na segurança operacional, influenciando o desgaste dos pneus e o coeficiente de atrito. De maneira geral, a integração de dados de resistência à derrapagem nos modelos de gerenciamento de pavimentos é fundamental para garantir a segurança dos pavimentos aeroportuários.

### 2.2.3 Cumulative Damage Factor (CDF)

O dimensionamento de pavimentos aeroportuários no Brasil é realizado baseando-se nos métodos desenvolvidos pela *Federal Aviation Administration* (FAA) (Ramos *et al.*, 2017). Consolidado em 2009, o método da FAA utiliza o *software* chamado de *FAA Rigid and Flexible Iterative Elastic Layered Design* (FAARFIELD) (Cremonese e Mattos, 2021). O FAARFIELD substituiu o conceito de “aeronave crítica de projeto” pelo *mix* de aeronaves, pois proporcionam danos mais relevantes que apenas um tipo de aeronave. Destaca-se ainda que devem ser consideradas apenas as decolagens das aeronaves, uma vez que as aeronaves solicitam mais a estrutura na decolagem, pois estão com o peso máximo (Silva e Rody, 2016).

O conceito que é adotado pela FAA no processo de dimensionamento, seja de estruturas novas ou projetos de reabilitação, utilizando o *software* FAARFIELD, é o *Cumulative Damage Factor* (CDF), que relaciona as passagens ou decolagens aplicadas no pavimento e as passagens ou decolagens para a falha da estrutura, de acordo com a regra de Miner, como demonstrado na Equação 1 (Silva e Rody, 2016). A Tabela 9 mostra os limites para o CDF (FAA, 2009).

$$\text{CDF} = \frac{\text{Passagens Aplicadas}}{\text{Passagens Para a falha}} \quad (1)$$

Tabela 9 - Limites do CDF.

<b>CDF &lt; 1</b>	O pavimento ainda tem vida útil restante, e o valor do CDF indica a fração da vida que já foi utilizada.
<b>CDF = 1</b>	O pavimento utilizou toda a sua vida útil por fadiga.
<b>CDF &gt; 1</b>	O pavimento excedeu sua vida útil por fadiga.

Fonte: Adaptado de FAA (2009).

A Tabela 10 apresenta alguns estudos da literatura que usaram o *software* FAARFIELD e o conceito de CDF para dimensionar pavimentos aeroportuários.

Tabela 10 - Estudos sobre dimensionamento de pavimento aeroportuário e uso do CDF.

Referência	Objetivo	Resultados
Ramos <i>et al.</i> (2017)	Aplicar e avaliar os métodos de dimensionamento de pavimentos aeroportuários desenvolvidos pela FAA ao Aeroporto Internacional Presidente Juscelino Kubitschek, em Brasília, para verificar a adequação desses métodos às condições específicas do aeroporto, considerando as cargas das aeronaves, a vida útil do pavimento e as características climáticas e operacionais da região.	Os pavimentos apresentam uma vida útil adequada para a maioria das aeronaves em operação. Necessidade de reforços em alguns segmentos da pista, especialmente para operações de aeronaves de grande porte e alta frequência, que aceleram o desgaste e aumentam o valor do CDF. O CDF indicou que, alguns trechos da pista apresentam sinais de fadiga e podem exigir intervenções futuras para evitar falhas estruturais.

Tabela 10 - Continuação...Estudos sobre dimensionamento de pavimento aeroportuários e utilização do conceito de CDF.

<b>Silva e Rody (2016)</b>	Aplicar o método de dimensionamento de pavimentos aeroportuários da FAA ao Aeroporto Internacional de Foz do Iguaçu (SBFI) visando avaliar a adequação desse método para as condições específicas do aeroporto, que atende a aeronaves nacionais e internacionais de diferentes portes, e propor soluções para garantir a durabilidade do pavimento frente ao tráfego aéreo projetado.	A espessura dos pavimentos é adequada para suportar a maioria das aeronaves em operação. Alguns trechos do pavimento estão próximos do limite de fadiga e podem exigir intervenções a curto prazo para evitar a ocorrência de fissuras ou falhas estruturais. Importância de uma manutenção preventiva e monitoramento contínuo dos pavimentos, para garantir que o desgaste seja controlado e que a segurança operacional seja mantida.
<b>Cremonese e Mattos (2021)</b>	Avaliar a influência do módulo de resiliência (MR) da mistura asfáltica na vida útil de projeto de pavimentos aeroportuários, utilizando como estudo de caso o Aeroporto Regional do Vale do Taquari.	Misturas asfálticas com maior MR resultam em pavimentos mais duráveis, capazes de suportar um maior número de operações sem apresentar falhas estruturais prematuras. O aumento do MR foi diretamente associado a uma redução no CDF, indicando que o pavimento poderia suportar mais ciclos de carga antes de alcançar o limite de fadiga. Foi possível prever uma vida útil significativamente maior para o pavimento ao adotar um MR otimizado, proporcionando economia de custos com manutenção a longo prazo.
<b>Santilli e Correia (2024)</b>	Avaliar o CDF de 20 pavimentos aeroportuários brasileiros, utilizando dois programas: o FAARFIELD e o BAKFAA.	O CDF variou significativamente entre os diferentes aeroportos, refletindo as condições únicas de operação e tráfego de cada um. Em pavimentos que ainda tinham vida útil restante, o valor do CDF indicou a fração da vida útil consumida. Para alguns pavimentos, o CDF estava próximo de 1, sinalizando que a vida útil por fadiga estava quase esgotada. Em outros casos, os pavimentos já haviam excedido sua vida útil, com valores de CDF superiores a 1, sugerindo a necessidade urgente de manutenção ou substituição.

Tabela 10 - Continuação...Estudos sobre dimensionamento de pavimento aeroportuários e utilização do conceito de CDF.

Referência	Objetivo	Resultados
Chaves <i>et al.</i> (2025)	Avaliar a condição estrutural de uma PPD brasileira utilizando o método ACR/PCR, com base em dados defletoométricos (FWD) e retroanálise, verificando a admissibilidade operacional das aeronaves do <i>mix</i> de tráfego e a vida útil remanescente da estrutura.	O CDF foi usado para quantificar o dano acumulado no subleito causado pelo <i>mix</i> de aeronaves ao longo do tempo, atribuir contribuição individual de dano para cada aeronave (B737-800 e B737-700 foram as mais críticas), estimar a vida útil remanescente e avaliar a compatibilidade operacional entre <i>mix</i> de tráfego e capacidade estrutural. O CDF obtido foi de 0,90, indicando 90% da vida consumida e 2 anos remanescente.

Os estudos apresentados na Tabela 10 exploram diferentes abordagens para o dimensionamento e a avaliação da vida útil de pavimentos aeroportuários, com ênfase no uso de métodos da FAA e no cálculo do CDF. Em todos os casos, constatou-se que o CDF é uma ferramenta essencial para avaliar o desgaste e a fadiga dos pavimentos, fornecendo informações sobre a necessidade de manutenção ou reforço. De modo geral, os estudos indicam que o uso adequado do CDF, aliado à escolha de materiais de alta qualidade, é fundamental para prolongar a vida útil dos pavimentos aeroportuários e otimizar os custos de manutenção.

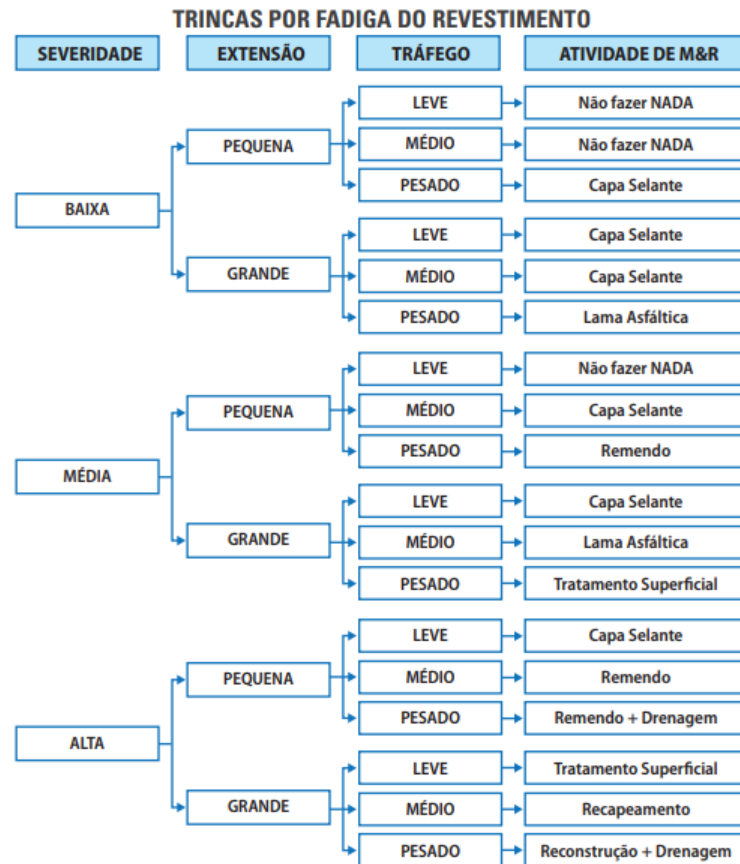
### 2.3 Manutenção e Reabilitação do Pavimento Aeroportuário

Os pavimentos se deterioram com o tempo, provocando o aparecimento de defeitos de superfície. Estes defeitos são causados pela combinação de condições climáticas e ambientais, operações de pouso e decolagem, deslocamentos das aeronaves, materiais utilizados e técnicas construtivas. Nesse sentido, medidas preventivas devem ser aplicadas no revestimento dos pavimentos aeroportuários para garantir a sua preservação e a integridade da sua estrutura (Oliveira, 2009).

A manutenção e a reabilitação de pavimentos têm dois objetivos diferentes. Enquanto a manutenção concentra-se em preservar a condição atual do pavimento, sua segurança e a qualidade do tráfego, a reabilitação busca melhorar estrutural ou funcionalmente o pavimento, prolongando sua vida útil e contribuindo para a sua qualidade geral. Assim, atividades de M&R podem ser divididas em manutenção corretiva, preventiva, reforço e reconstrução (Sousa, 2024). Pantigoso (1998) propôs um modelo de árvore de decisão para seleção das atividades de

M&R de pavimentos, considerando o tipo de defeito, a sua extensão e severidade e o volume de tráfego, conforme observado na Figuras 2.

Figura 2 - Árvore de decisão para seleção das atividades de M&R (defeito – trincas).



Fonte: ANAC (2017).

Oliveira (2009) propôs estratégias de M&R para o Aeroporto Internacional de Fortaleza considerando as condições de resistência à derrapagem do pavimento, com base nos valores limites especificados pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) para o coeficiente de atrito e a macrotextura. Posteriormente, Oliveira (2016) desenvolveu um modelo de gerenciamento de pavimentos aeroportuários em nível de rede com dados desse mesmo aeroporto, utilizando parâmetros estruturais, funcionais e de resistência à derrapagem. O autor propôs as atividades de M&R apresentadas na Tabela 11, aplicadas a um modelo de árvore de decisão baseado nos critérios de avaliação da condição do pavimento, totalizando 72 combinações.

Tabela 11 - Atividades de M&amp;R para pavimentos aeroportuários.

<b>Código</b>	<b>Manutenção (M)</b>	<b>Unidade</b>
<b>M0</b>	Inspeções de acompanhamento	-
<b>M1</b>	<i>Grooving</i>	m <sup>2</sup>
<b>M2</b>	Selagem de trincas	m <sup>2</sup>
<b>M3</b>	Remoção do contaminante	m <sup>2</sup>
<b>M4</b>	Retexturização do revestimento	m <sup>2</sup>
<b>M5</b>	Revestimentos asfálticos não-estruturais: microrrevestimento	m <sup>2</sup>
<b>Código</b>	<b>Reabilitação (R)</b>	<b>Unidade</b>
<b>R6</b>	Reciclagem do pavimento	m <sup>3</sup>
<b>R7</b>	Recomposição de camadas granulares	m <sup>3</sup>
<b>R8</b>	Reforço do pavimento: convencional ou com fresagem	m <sup>3</sup>
<b>R9</b>	Revestimento asfáltico estrutural convencional: Concreto Asfáltico (CA) / Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ)	m <sup>3</sup>
<b>R10</b>	Revestimentos asfálticos estruturais especiais: Camada Porosa de Atrito (CPA) ou Matriz Pétreo de Asfalto (SMA)	m <sup>3</sup>

Fonte: Oliveira (2016).

Nesse contexto, conforme observado, alguns estudos da literatura recomendam o uso de árvores de decisão como ferramenta de apoio a tomada de decisão quanto as atividades de M&R. A árvore de decisão oferece maior flexibilidade em comparação com métodos tradicionais, permitindo a representação de uma série de eventos ao longo de seus ramos, englobando múltiplas etapas decisórias (Sousa, 2024).

Ao integrar fatores como degradação, tráfego, classificação do pavimento, entre outros, as árvores de decisão simplificam e padronizam o processo de tomada de decisão, permitindo uma alocação eficaz de recursos (Sousa, 2024). Nesta pesquisa será utilizada uma árvore de decisão baseada nos estudos de Oliveira (2009), Oliveira (2016) e Sousa (2024) para definição das estratégias de M&R para uma PPD. Outros estudos sobre M&R de pavimentos aeroportuários podem ser encontrados na Tabela 12.

Tabela 12 - Estudos sobre M&amp;R de pavimentos.

<b>Referência</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Resultados</b>
<b>Oliveira e Nobre Júnior (2008)</b>	Apresentar os resultados dos serviços de engenharia realizados para a correção de patologia asfáltica identificada na pista de taxiamento do Aeroporto Internacional de Fortaleza.	Foi identificado inchamento das bordas da pista de taxiamento. A correção foi realizada sempre em período diurno. Os serviços mostraram-se satisfatórios, pois foi possível eliminar a patologia naquele trecho.
<b>Dong e Huang (2012)</b>	Analisar a eficácia e o custo-benefício de diversas reabilitações de pavimentos asfálticos, utilizando regressão múltipla para avaliar a influência da espessura do revestimento, espessura do pavimento, volume de tráfego e condições do pavimento pré-reabilitação.	Recapeamento e fresagem reduziram a irregularidade. Camada fina de revestimento, alto nível de tráfego e más condições do pavimento pré-reabilitação aumentaram a taxa de deterioração.

Tabela 12 - Continuação...Estudos sobre M&amp;R de pavimentos.

Referência	Objetivo	Resultados
<b>Durán e Fernandes Júnior (2014)</b>	Aplicar o PAVEAIR no Aeroporto Estadual de Araraquara-SP para propor estratégias de M&R.	Obteve-se um PCI médio de 67 (pavimento do aeródromo com condições razoáveis de operação). Estratégias de M&R foram escolhidas baseadas em árvores de decisão e consistiram na selagem de trincas, aplicação de capas selantes, tratamentos superficiais e recapeamento do pavimento.
<b>Humphries e Lee (2015)</b>	Realizar um estudo de caso de práticas de manutenção de pavimentos em aeroportos de aviação geral no Texas por meio de entrevistas com os gestores aeroportuários.	A vedação de trincas e a aplicação de lama asfáltica são os dois métodos mais utilizados em atividades de manutenção corretiva. A maioria dos gestores aeroportuários da aviação geral depende da Divisão de Aviação do Departamento de Transportes do Texas ou uma empresa de engenharia para gerenciar o pavimento do aeródromo e não adotam práticas rotineiras de manutenção preventiva.
<b>Di Mascio e Moretti (2019)</b>	Avaliar, por meio de medidas de capacidade de carga, aderência pneu-pavimento e defeitos no pavimento, uma rede pavimentada de um aeroporto italiano composta por uma PPD, uma pista de taxiamento paralela e cinco pistas de taxiamento de saída de modo a identificar as atividades de M&R necessárias.	Foram identificadas seções críticas, nas quais diversas alterações estruturais, funcionais e defeitos foram encontrados. As obras estruturais e funcionais necessárias envolveram a maior parte da PPD, da pista de taxiamento paralela, e duas pistas de taxiamento de saída.
<b>Barua e Zou (2022)</b>	Propor e demonstrar uma abordagem integrada de aprendizado de máquina supervisionado e aprendizado por reforço para apoiar o planejamento de atividades de M&R de pavimentos aeroportuários, aplicada a dados reais do Chicago O'Hare <i>International Airport</i> .	A abordagem integrada reduz custos de M&R em relação às práticas tradicionais ao combinar previsão de deterioração via modelos supervisionados com aprendizado por reforço, permitindo políticas mais eficientes e adaptativas ao longo do ciclo de vida do pavimento. Como resultado, oferece um apoio à decisão mais flexível e econômico para gestores aeroportuários.
<b>Aliha et al. (2024)</b>	Investigar o comportamento mecânico de pavimentos asfálticos intactos, trincados e reparados, avaliando diferentes métodos de reabilitação e reforço de trincas.	Reparos simples com asfalto melhoraram parcialmente o desempenho, enquanto selantes estruturais como epóxi e concreto polimérico elevaram a resistência acima da condição intacta. O reforço com remendo compósito mostrou o melhor resultado, alcançando aumento de até 258% e restaurando a integridade mecânica.

Os estudos analisados na Tabela 12 abordam diversas estratégias para M&R de pavimentos, evidenciando a importância de práticas bem definidas para garantir a funcionalidade e segurança dessas infraestruturas. Esses estudos reforçam a necessidade de abordagens variadas e integradas para a manutenção eficiente dos pavimentos aeroportuários.

#### **2.4 Uso de Redes Neurais Artificiais em Modelos de Previsão de Desempenho de Pavimentos Aeroportuários**

Diversos modelos de previsão de desempenho de pavimentos foram desenvolvidos na literatura. Esses modelos objetivam prever quando o pavimento irá atingir condições críticas, dando um indicativo de necessidade de atividades de manutenção e reabilitação (M&R). Os modelos, além de prever a vida útil do pavimento, auxiliam na determinação da melhor alternativa de intervenção que trará maior benefício para a sociedade (Campos, 2004).

Os modelos de previsão de desempenho podem ser classificados de duas maneiras: em termos de forma, os modelos podem ser determinísticos ou probabilísticos e em termos de sua natureza os modelos podem ser empíricos ou mecanístico-empíricos. Os modelos determinísticos lidam com as respostas primárias, estruturais, funcionais e de deterioração, enquanto os modelos probabilísticos podem ser divididos em curvas de sobrevivência, modelos de simulação e modelos Markovianos (Prediger e Tozetto, 2014).

Com a popularização da Inteligência Artificial (IA), as Redes Neurais Artificiais (RNA) têm sido amplamente utilizadas em diversas áreas devido à sua capacidade de lidar com grandes volumes de dados e resolver problemas complexos. A sua utilização tem se destacado também na criação de modelos de previsão de desempenho de pavimentos aeroportuários. Um exemplo é o estudo de Moura (2021), que utilizou RNA para criar um modelo de previsão do coeficiente de atrito para a pista de pouso e decolagem (PPD) do aeroporto de Natal, no Rio Grande do Norte, para auxiliar na definição de estratégias de M&R.

As RNA são algoritmos que utilizam simulações matemáticas de neurônios biológicos para processar informações e prever padrões. Uma RNA é composta por várias camadas de elementos de processamento paralelo, chamadas de neurônios. Entre uma camada de entrada e uma de saída podem existir uma ou mais camadas ocultas. Os neurônios dessas camadas estão conectados aos neurônios de uma camada vizinha por fatores de ponderação, também chamados de pesos ( $W$ ) e bias ( $b$ ), que são ajustados durante o processo de treinamento da rede (Quariguasi *et al.*, 2019).

Dentre os tipos de RNA mais utilizadas, destaca-se o *Multilayer Perceptron* (MLP). Há muitos outros tipos de RNA além do MLP, com diferentes objetivos. Em geral, as RNA podem executar diferentes tarefas, principalmente previsão e classificação. As RNA aprendem de duas formas, por meio de aprendizagem supervisionada ou não supervisionada. A aprendizagem supervisionada é utilizada quando há um valor alvo associado com cada entrada do conjunto de treinamento. A saída da rede é comparada com o valor alvo e sua diferença é utilizada para alterar os pesos. A aprendizagem não supervisionada ocorre quando não há valores alvo para a saída da rede. Nesse caso, a rede aprende através de correlações entre os padrões das variáveis de entrada (Gomes, 2005).

As RNA têm sido utilizadas com sucesso em tarefas de predição e modelagem de séries temporais, que são conjuntos de observações ordenadas no tempo (Spancerski e Santos, 2021). As observações vizinhas são dependentes entre si e o estudo de uma série temporal consiste em analisar e modelar esta dependência. Com isso, é possível fazer previsões de valores futuros (Ballini, 2000).

Para a modelagem de dados de séries temporais, podem ser utilizadas as Redes Neurais Recorrentes (RNR). A estrutura de uma RNR tem por base uma rede MLP com algumas modificações, como a introdução da realimentação ou recorrência. As realimentações ocorrem quando as saídas de neurônios de determinada camada são reintroduzidas como entradas de neurônios de camadas anteriores ou da própria. Ainda, um neurônio pode ser realimentado por sua própria saída. Essas possibilidades fazem com que a arquitetura de uma RNR possa tomar diversas formas (Gomes, 2005).

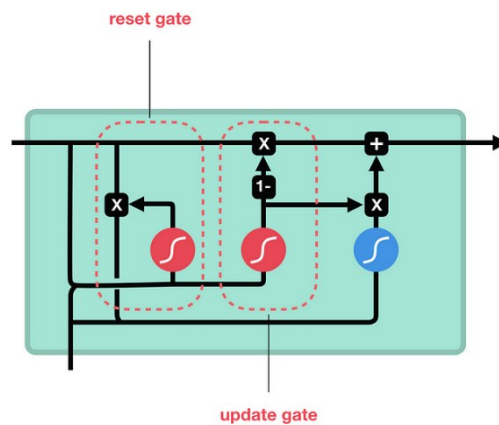
O efeito prático da realimentação é a existência de uma memória de curto prazo, pois a adição da recorrência cria um efeito temporal, permitindo que certas conexões da rede sejam utilizadas em instantes de tempo diferentes. No entanto, ainda que, na teoria, as RNR sejam capazes de lidar com dependências de longo termo, na prática, isso muitas vezes não é possível, devido aos problemas de explosão ou desaparecimento de gradiente (Nelson, 2017; Moura, 2018).

Para resolver o problema do desaparecimento do gradiente, Hochreiter e Schmidhuber (1997) introduziram as Redes *Long Short-Term Memory* (LSTM) que oferecem um desempenho melhor para lidar com grandes sequências de dados. As redes LSTM mantêm o fluxo do erro constante através de unidades especiais chamadas portões ou *gates*. Nas redes LSTM são utilizadas funções sigmóides ( $\sigma$ ) em *gates* que utilizam funções tangentes hiperbólicas ( $\tanh$ ) e são responsáveis por regular as informações a serem passadas adiante ou armazenadas na memória interna. A primeira operação realizada na LSTM é determinar quais

informações serão removidas da memória, também chamada de estado da célula. Essa etapa é realizada pelo *gate* do esquecimento.

Outra variação das RNR para resolver o problema do desaparecimento do gradiente são as redes *Gated Recurrent Unit* (GRU), desenvolvidas por Cho *et al.* (2014). Essas redes são semelhantes a LSTM, no entanto, não utilizam o estado da célula para transferir informações, substituindo-o por um estado oculto. Substituir o estado da célula pelo estado oculto simplifica o modelo e reduz sua complexidade, mas pode diminuir sua capacidade de armazenar dependências de longo prazo (Chung *et al.*, 2014). A arquitetura da GRU possui apenas dois portões, um portão de redefinição (*reset gate*) e um portão de atualização (*update gate*). A Figura 3 apresenta a arquitetura da rede GRU.

Figura 3 - Arquitetura da rede GRU.



Fonte: Phi, 2018.

A primeira etapa do cálculo da rede GRU ocorre no portão de redefinição (*reset gate*). Esse portão é derivado e calculado usando o estado oculto da etapa anterior e os dados de entrada na etapa atual. Para isso, multiplica-se o estado oculto anterior e a entrada atual com seus respectivos pesos e soma-os antes de passar a soma através de uma função sigmoide. A função sigmoide transforma os valores entre 0 e 1, permitindo que o portão filtre entre as informações menos importantes e mais importantes nas etapas subsequentes, conforme Equação 2 (Cho *et al.*, 2014).

$$gate_{reset} = \sigma(W_{input_{reset}} \times x_t + W_{hidden_{reset}} \times h_{t-1}) \quad (2)$$

Após, uma função de ativação tangente hiperbólica ( $\tanh$ ) é aplicada ao resultado final para obter  $r$  na Equação 3 (Cho *et al.*, 2014).

$$r = \tanh(gate_{reset} (W_{h1} \times h_{t-1}) + W_{x1} \times x_t) \quad (3)$$

A segunda etapa consiste em obter o portão de atualização (*update gate*). O *update gate* é calculado usando o estado oculto anterior e os dados de entrada atuais, conforme Equação 4 (Cho *et al.*, 2014).

$$Gate_{update} = \sigma(W_{input_{update}} \times x_t + W_{hidden_{update}} \times h_{t-1}) \quad (4)$$

O vetor *update* é submetido a multiplicação por elementos com o estado oculto anterior para obter *u* na Equação 5, que será usada para calcular a saída final posteriormente. O objetivo do *update gate* é ajudar o modelo a determinar quanto das informações passadas armazenadas no estado oculto anterior precisam ser retidas para o futuro (Cho *et al.*, 2014).

$$u = gate_{update} \times h_{t-1} \quad (5)$$

Na última etapa, reutiliza-se o *update gate* para obter o estado oculto atualizado. Para isso, utiliza-se a versão inversa em elementos do mesmo vetor *update* ( $1 - update\ gate$ ) com uma multiplicação em elementos com a saída do *reset gate*, *r*, conforme Equação 6. O objetivo desta operação é o *update gate* determinar qual parte das novas informações deve ser armazenada no estado oculto (Cho *et al.*, 2014).

$$h_t = r \times (1 - gate_{update}) + u \quad (6)$$

Embora as redes GRU sejam amplamente utilizadas em diversas áreas, como processamento de linguagem natural, sua aplicação em modelos de previsão de desempenho de pavimentos aeroportuários ainda é limitada. Essas redes têm potencial para lidar com séries temporais e dados sequenciais, características comuns nos dados de pavimentos. No entanto, a adoção dessa tecnologia nesse campo específico está apenas começando, com poucos estudos explorando seu uso em pavimentos aeroportuários.

Zhou *et al.* (2021) desenvolveram um modelo de previsão do IRI usando uma RNR para dados de rodovias. Os autores usaram dados históricos de tráfego, informações ambientais e defeitos (deformação permanente, trincas por fadiga e trincas transversais) combinado com um modelo de RNA para prever o IRI ao longo da vida útil do pavimento.

A Tabela 13 apresenta alguns estudos da literatura sobre obtenção de modelos de previsão de desempenho de pavimentos aeroportuários.

Tabela 13 - Estudos sobre modelos de previsão de desempenho de pavimentos aeroportuários.

Referência	Objetivo	Método	Resultados
<b>Yuan e Mooney (2003)</b>	Desenvolver modelos de desempenho adaptativos para o SGPA de Oklahoma, visando melhorar a avaliação da condição dos pavimentos e a priorização das atividades de M&R.	Foi utilizado um método de modelagem baseado no PCI. Foram identificadas variáveis que influenciam significativamente a deterioração dos pavimentos, formando famílias de pavimentos conforme a função, causa do dano e espessura da camada.	Os modelos previram padrões de deterioração, incorporando opiniões de especialistas e integrando automaticamente os efeitos das M&R. A base de dados adaptativa permitiu a atualização automática das previsões. Proporcionou uma gestão mais eficaz da M&R para mais de 70 aeroportos de aviação geral em Oklahoma.
<b>Luca e Dell'Acqua (2014)</b>	Explorar a relação entre o atrito e os dados de tráfego da PPD do aeroporto de Lamezia Terme na Itália, de modo a desenvolver modelos de previsão de desempenho para aplicação em SGPA.	Utilizou dados experimentais de nove anos para desenvolver modelos matemáticos que preveem a curva de deterioração da PPD em função da estrutura, carga e número de passagens das aeronaves.	Os modelos de desempenho podem prever com precisão a deterioração da PPD, sendo essenciais para melhorar a eficiência da manutenção do pavimento e a segurança operacional do aeroporto.
<b>Assis et al. (2016)</b>	Desenvolver modelos de previsão da condição de pavimentos aeroportuários com uso de RNA.	Foram realizadas 20 simulações. Foram consideradas três escalas de condição do pavimento, com 7, 5 e 3 categorias. Foi utilizado as variáveis numéricas Severidade, Densidade do Defeito, Valor Deduzido e PCI e as variáveis categóricas Seção, Severidade e Defeito.	Alto índice de acerto de alguns dos modelos gerados, destacando-se que os melhores resultados foram obtidos com a escala com três categorias (Condição Boa, Regular ou Ruim).
<b>Ansarilari e Golroo (2019)</b>	Desenvolver um plano de gerenciamento de pavimento aeroportuário que considera idade do pavimento, frequência de carga de tráfego, condições climáticas e efeitos das ações de manutenção.	Foi utilizado o método de Cadeia de Markov para modelar a deterioração dos pavimentos e o algoritmo genético multi-objetivo supervisionado (NSGA-II) para otimizar as atividades de manutenção.	Os modelos foram precisos e o plano de manutenção minimiza o orçamento, mantendo condições aceitáveis do pavimento. A abordagem híbrida melhora a precisão do planejamento de manutenção e a alocação de recursos, resultando em eficiência operacional e segurança para os aeroportos.

Tabela 13 - Continuação...Estudos sobre modelos de previsão de desempenho de pavimentos aeroportuários.

Referência	Objetivo	Método	Resultados
<b>Cai et al. (2019)</b>	Desenvolver um método automatizado para identificação e medição de ranhuras em pistas de aeroportos, melhorando a drenagem e resistência à derrapagem.	Utilizou-se o <i>GrooveNet</i> (rede neural baseada em LSTM) para identificar e medir ranhuras automaticamente e um classificador <i>Naïve Bayes</i> modificado para distinguir entre ranhuras e juntas de laje.	O <i>GrooveNet</i> e o <i>Naïve Bayes</i> modificado mostraram-se robustos e precisos. A metodologia proposta permite uma avaliação mais eficaz das ranhuras da PPD, auxiliando na manutenção preventiva do pavimento.
<b>Barua et al. (2020)</b>	Investigar a deterioração de pavimentos de PPD e pistas de taxiamento, especificamente no Aeroporto Internacional O'Hare de Chicago, utilizando o método de <i>Gradient Boosting Machine</i> (GBM).	Variáveis de entrada como idade do pavimento, material, histórico de M&R, condições climáticas e carga de tráfego aéreo foram consideradas para avaliar a deterioração do PCI.	Os modelos GBM mostraram uma precisão superior na previsão do PCI em comparação com métodos de regressão linear, não-linear, RNA e <i>random forest</i> .
<b>Barua e Zou (2022)</b>	Melhorar o planejamento das atividades de M&R dos pavimentos aeroportuários, utilizando uma abordagem combinada de aprendizado de máquina supervisionado (AS) e aprendizado por reforço (AR).	Foi utilizado AS, para modelar a deterioração do pavimento e AR ( <i>Q-learning</i> ) para determinar a manutenção mais eficazes ao longo do tempo. Os dados utilizados são do Aeroporto Internacional O'Hare de Chicago.	Foi possível prever com precisão a deterioração dos pavimentos e planejar atividades de M&R de maneira mais eficaz, levando a uma redução significativa nos custos de manutenção em comparação com as práticas atuais.
<b>Fortney et al. (2022)</b>	Desenvolver um modelo de regressão de componentes principais para avaliar os efeitos do clima local e do tráfego no desempenho dos pavimentos aeroportuários.	Os dados utilizados incluíram informações como temperatura e precipitação, volume e o tipo de aeronave que utiliza a PPD.	Tanto o clima quanto o tráfego têm impactos significativos na degradação de pavimentos aeroportuários.
<b>Midtfjord et al. (2022)</b>	Melhorar a segurança dos pousos ao prever as condições de aderência das PPD, por meio de modelos de aprendizado de máquina, particularmente em climas de inverno onde neve e gelo podem reduzir o atrito disponível entre os pneus e o pavimento.	Utilização do algoritmo <i>XGBoost</i> para desenvolver um modelo de classificação para identificar condições escorregadias na PPD e um de regressão para prever o nível de escorregamento. Foram usados dados do Aeroporto de Oslo.	O modelo de classificação alcançou uma área sob a curva ROC (AUC) de 0,95. O modelo de regressão apresentou um erro médio absoluto (MAE) de 0,0254. Ambos os modelos superaram métodos anteriores de avaliação da PPD.

Tabela 13 - Continuação...Estudos sobre modelos de previsão de desempenho de pavimentos aeroportuários.

Referência	Objetivo	Método	Resultados
Cicmanec <i>et al.</i> (2025)	Avaliar a viabilidade de usar acelerômetros de <i>smartphones</i> acoplados a um veículo comum para identificar e classificar defeitos em pavimentos aeroportuários.	Foi testado o desempenho de redes neurais, incluindo LSTM, bidirecional LSTM e <i>Temporal Convolutional Networks</i> (TCN), na classificação de padrões de defeitos com base em séries temporais obtidas dos sensores.	Os modelos apresentaram precisão elevada na classificação de defeitos, sendo que as TCNs, apesar de menos precisas, exigiram menos dados de treinamento sendo mais prática. O desempenho elevado indica que sensores simples podem ser usados para monitorar a condição superficial de pavimentos aeroportuários.

Os estudos abordados na Tabela 13 utilizam diversas técnicas para melhorar a gerência e a manutenção de pavimentos aeroportuários. Esses estudos demonstram como a aplicação de técnicas de aprendizado de máquina e modelagem matemática pode melhorar a segurança e a eficiência operacional ao desenvolver modelos para prever o desempenho dos pavimentos aeroportuários.

## 2.5 Análise do Custo de Ciclo de Vida e Análise do Ciclo de Vida do Pavimento

As decisões sobre M&R de pavimentos aeroportuários requerem uma abordagem mais deliberada e sistemática, principalmente em países em desenvolvimento, devido às restrições orçamentárias. No entanto, os tomadores de decisão geralmente não consideram requisitos de longo prazo (Babashamsi *et al.*, 2022a).

Devido a isso, os gestores não costumam avaliar a relação custo-benefício das várias alternativas de M&R, resultando em gastos desnecessários. O desenvolvimento mais recente da Análise de Custos do Ciclo de Vida (ACCV) do pavimento aeroportuário fornece uma maneira mais eficaz para gerenciar o pavimento de forma econômica (Babashamsi *et al.*, 2022a).

De acordo com APTP (2011), embora várias definições tenham sido desenvolvidas ao longo dos anos para descrever a ACCV, o consenso é de que é uma técnica de análise econômica que permite comparar alternativas de investimento com diferentes fluxos de custos. Em pavimentação, a ACCV pode ser definida como uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão

que ajuda projetistas e planejadores a identificarem estratégias mais econômicas para o gerenciamento de pavimentos (AAPTP, 2011).

A ACCV deve incluir todos os custos relacionados ao pavimento durante a sua vida útil. Sendo assim, devem ser definidos os custos de construção, manutenção, reabilitação e reconstrução do pavimento. Além disso, devem ser incluídos os custos indiretos/usuários, como os custos relacionados ao tempo de viagem, custos operacionais dos veículos, custos de acidentes e custos de atrasos de passageiros (Alaloul *et al.*, 2021). Para isso, podem ser utilizados parâmetros como Valor Presente Líquido (VPL).

O VPL converte todos os fluxos de caixa futuros, como receitas e despesas, em seu valor presente, descontando-os por uma taxa de desconto apropriada. Ele permite determinar se um projeto é economicamente viável ao comparar o valor presente de seus fluxos de caixa com o investimento inicial, sendo aplicável a avaliação de projeto e a comparação de alternativas (Carneiro *et al.*, 2023). Nessa pesquisa foi considerada apenas os custos de M&R e os custos ambientais. Assim, o VPL dos custos pode ser calculado pela Equação 7.

$$VPL = \sum_{k=1}^n Custos \left[ \frac{1}{1+i^n} \right] \quad (7)$$

Onde:

VPL - Valor Presente Líquido.

i - taxa de desconto.

n - período da análise.

Duas abordagens podem ser utilizadas para a ACCV de pavimentos aeroportuários: o método determinístico e o método probabilístico. As abordagens diferem na maneira como tratam a variabilidade associada aos dados de entrada. Na ACCV determinística, cada variável de entrada é assumida como tendo um valor fixo e discreto, enquanto no método probabilístico, as entradas da ACCV são especificadas pelas funções probabilísticas que transmitem tanto o intervalo de entradas prováveis, quanto a probabilidade de elas acontecerem (Babashamsi *et al.*, 2022a). A Tabela 14 apresenta os principais programas de ACCV disponíveis na literatura (AAPTP, 2011).

Tabela 14 - Principais *Softwares* de ACCV.

<b>Instituição</b>	<b>Referência</b>	<b>Software</b>
FHWA	Life-Cycle Cost Analysis in Pavement Design. Technical Bulletin. Publication No. FHWA-SA-98-079. 1998	RealCost v 2.1 e 2.2 (2004/2005)
AASHTO/NCHRP	Mechanistic-Empirical Pavement Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, Appendix C – Life Cycle Cost Analysis Guidelines (2004)	LCCA 2002 (adaptação do RealCost)
Asphalt Pavement Alliance (APA)	Pavement Life-Cycle Studies Using Actual Cost Data: A Synthesis (2005)	Life Cycle Cost Analysis Program v 3.1 (2005)
Asphalt Institute (AI)	State of the Practice: Pavement Type Selection (2004)	LCCOST
FAA	Airfield Asphalt Pavement Technology Program. Life cycle cost analysis for airport pavements. Final Report AAPTP 06-06 (2011)	AirCost

Fonte: AAPTP (2011).

Os *softwares* da FHWA, AASHTO/NCHRP, APA e AI, apresentados na Tabela 14, foram desenvolvidos para pavimentos rodoviários, enquanto o programa da FAA foi desenvolvido para utilização em pavimentos aeroportuários. Esses programas utilizam planilhas eletrônicas para o cálculo do custo do ciclo de vida, a partir do indicador VPL. Os *softwares* foram desenvolvidos utilizando *Visual Basic for Applications* (VBA) e planilhas do *Microsoft Excel*®. No entanto, os programas apresentam limitações em relação a determinação dos custos do usuário, a quantidade de cenários alternativos de atividade de M&R, a inclusão ou não da abordagem probabilística e, principalmente, a exclusão dos custos ambientais.

Alguns estudos sobre ACCV de pavimentos foram realizados por Reigle e Zaniewski (2002), Babashamsi *et al.* (2016), Butt *et al.* (2021) e Alaloul *et al.* (2021). Esses estudos destacam as vantagens e desvantagens da ACCV para pavimentos aeroportuários e estabelecem diretrizes de como deve ser realizada, a partir de métodos probabilísticos e determinísticos. A Tabela 15 apresenta alguns estudos da literatura sobre ACCV em pavimentos aeroportuários.

Tabela 15 - Estudos sobre ACCV em pavimentos aeroportuários.

Referência	Objetivo	Método	Resultados
Nowak (2013)	Apresentar a ACCV e o projeto do pavimento para a nova PPD paralela no Aeroporto Internacional de Calgary, de modo a desenvolver uma abordagem sustentável e eficiente, considerando fatores econômicos e de durabilidade a longo prazo.	Utilizou ACCV como ferramenta para avaliar os custos totais de diferentes opções de pavimentação. Realizou análises detalhadas de engenharia e estudos de tráfego para garantir a adequação das opções de pavimentação às demandas operacionais do aeroporto.	A seleção de materiais e métodos de construção impacta os custos a longo prazo e a performance da PPD. Pavimentos rígidos apresentaram maior durabilidade e menores custos de manutenção do que pavimentos flexíveis. Embora o custo inicial de pavimentos rígidos seja mais alto, os benefícios econômicos e operacionais ao longo do tempo compensam esse investimento inicial.
Das et al. (2015)	Avaliar a ACCV para pavimentos de aeroportos, a fim de determinar o tipo de pavimento mais econômico, considerando tanto os custos iniciais de construção quanto os custos de manutenção a longo prazo.	Utilizou o <i>software</i> FAARFIELD para projetar tanto pavimentos flexíveis quanto rígidos. Custos iniciais e de manutenção ao longo de um período de 20 anos foram calculados e comparados para ambos os tipos de pavimento.	O custo inicial do pavimento rígido é aproximadamente 21% maior do que o do pavimento flexível. No geral, os custos de manutenção do pavimento rígido são cerca de 78% menores do que os do pavimento flexível.
Heuvinck (2015)	Aplicar ACCV a um pavimento de aeroporto, especificamente na PPD principal do aeroporto de Lisboa, para avaliar duas alternativas de pavimentação flexível: uma usando <i>Stone Mastic Asphalt</i> (SMA) e a outra usando Concreto Asfáltico (CA).	Os custos diretos incluem a construção inicial e as atividades de M&R. Os custos indiretos estão associados à perda de receita durante as atividades de M&R. Foi utilizado um período de análise de 30 anos com uma taxa de desconto de 2,5%, no <i>software</i> <i>Aircost</i> .	Para as condições utilizadas na ACCV, a opção SMA é mais econômica tanto na análise determinística, quanto na análise probabilística.

Tabela 15 - Continuação...Estudos sobre ACCV em pavimentos aeroportuários.

Referência	Objetivo	Método	Resultados
<b>Bair et al. (2021)</b>	Demonstrar a aplicação prática e a importância da ACCV no processo de tomada de decisão de projetos de pavimentação aeroportuária. O estudo se concentra em um caso prático no Aeroporto Internacional de Tucson.	A ACCV foi realizada para a construção de uma nova PPD paralela e <i>taxiways</i> . Seguindo as diretrizes da FAA, a ACCV foi adaptada para as condições específicas do projeto para representar as atividades de M&R no período de análise de 40 anos.	As alternativas de pavimentação, com uma combinação de pavimento flexível e rígido, foram projetadas com base no uso futuro do pavimento, práticas de manutenção típicas e histórico de desempenho. Observou-se que essa abordagem proporciona um benefício significativo ao aeroporto e às agências governamentais.
<b>Zaki et al. (2021)</b>	Comparar os métodos Valor Futuro Líquido (VFL) e VPL dentro da ACCV para entender seu impacto na tomada de decisões relacionadas a projetos de pavimentação de aeroportos.	Foi realizado um estudo de caso. Custos específicos como Redução de Receita do Aeroporto e Custo de Atraso das Companhias Aéreas foram considerados custos indiretos.	O uso da vedação de trincas com sobreposição é 35,8% e 28,3% mais econômico em comparação com o concreto de cimento Portland e o concreto asfáltico, respectivamente.
<b>Babashamsi et al. (2022a)</b>	Explorar a perspectiva da ACCV e Avaliação de Risco para pavimentos aeroportuários, especificamente em relação ao adiamento da manutenção preventiva.	Foram utilizados métodos de ACCV e Avaliação de Risco, e examinados os custos ao longo do ciclo de vida e os riscos associados a diferentes estratégias de manutenção.	Adiar a manutenção preventiva pode resultar em custos mais altos ao longo do tempo devido ao aumento dos custos de manutenção e redução da vida útil do pavimento.
<b>Babashamsi et al. (2022b)</b>	Realizar um estudo comparativo entre métodos probabilísticos e determinísticos de ACCV aplicada a pavimentos aeroportuários, considerando custos diretos e indiretos.	Realizou-se uma análise comparativa entre métodos probabilísticos e determinísticos de ACCV, examinando-se como podem influenciar as projeções de custo e as decisões de investimento.	Métodos probabilísticos oferecem uma visão mais abrangente e realista dos custos, considerando incertezas e variações nos parâmetros. Métodos determinísticos são mais simples e diretos, mas podem subestimar a variabilidade e o risco associado aos custos de pavimentação.
<b>Chen e Xue (2025)</b>	Avaliar os impactos estruturais, ambientais e econômicos associados à eletrificação de caminhões pesados utilizados no transporte urbano de cargas, usando ACCV e ACV.	Abordagem integrada de ACCV e ACV, combinadas com modelos de desempenho estrutural do pavimento para estimar deterioração, vida útil, emissões e custos de M&R.	A eletrificação de caminhões pesados reduz as emissões de gases de efeito estufa, mas diminui a vida útil estrutural da via em função do aumento de carga por eixo, elevando os custos de M&R.

Os estudos sobre ACCV em pavimentos aeroportuários demonstram que o método é importante para proporcionar uma análise abrangente dos custos associados ao longo da vida útil dos pavimentos, incluindo construção e M&R. Ao considerar tanto os custos diretos quanto os indiretos, a ACCV permite uma tomada de decisão mais informada e estratégica. Além disso, a ACCV facilita a comparação de diferentes métodos e materiais de pavimentação, ajudando a identificar as opções mais eficientes e sustentáveis.

Nesse contexto, embora a ACCV esteja voltada predominantemente à dimensão econômica, a incorporação de análises complementares torna-se fundamental para uma avaliação mais abrangente da sustentabilidade. A Análise de Ciclo de Vida (ACV), por sua vez, é um método que permite identificar e avaliar o impacto ambiental e sua influência nos aspectos sociais dos sistemas de pavimentos durante a sua vida útil. Ela pode ser realizada por meio das seguintes etapas: (i) definição das metas e do escopo da avaliação; (ii) inventários dos fluxos de materiais, energia e outros recursos no sistema, e dos resíduos e poluição fora do sistema, denominado inventário do ciclo de vida (ICV); (iii) cálculo dos indicadores de impacto ambiental, denominado avaliação dos impactos de ciclo de vida (AICV); e (iv) interpretação dos indicadores e reporte dos resultados para apoiar a tomada de decisão (Butt et al., 2021).

Em relação aos custos ambientais, a Análise do Ciclo de Vida (ACV) do pavimento aeroportuário fornece os dados necessários para quantificar a avaliação ambiental para uma ACCV abrangente. Os custos ambientais, como os custos das emissões geradas pelas fases de construção e operação, também devem ser considerados na ACCV. Sendo assim, os dados gerados pelo processo de ACV podem ser utilizados no processo de ACCV, em que os indicadores da ACV são convertidos em parâmetros de custo (Alaloul et al., 2021).

Foram realizadas tentativas para definir o consumo de energia e emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) de vários tipos de pavimentos. Neste sentido, foi proposto em 1920 que a emissão de CO<sub>2</sub> deveria ser cobrada, sendo mais tarde acordada pela maior parte dos países, com a implementação do preço do carbono, como forma de superar o potencial de aquecimento global (Alaloul et al., 2021).

Incorporar o custo do carbono na ACV de projetos de pavimentação pode ser uma possível solução para minimizar os impactos ambientais nessa área. No entanto, a literatura contém poucos estudos de ACV para pavimentos aeroportuários, enquanto aponta para uma maior utilização em pavimentos rodoviários (Butt et al., 2021).

Algumas ferramentas facilitam a compilação dos dados de ICV do pavimento, como os softwares PaLATE, PE-2, EIO-LCA e SimaPro com o banco de dados *Ecoinvent* (Nascimento e Silva, 2021). A Tabela 16 apresenta alguns estudos sobre ACV em pavimentos aeroportuários

Tabela 16 - Estudos sobre ACV em pavimentos aeroportuários.

Referência	Objetivo	Resultados
<b>Zhang et al. (2008)</b>	Desenvolver um modelo integrado de ACV e ACCV para avaliar a sustentabilidade de sistemas de reforço de pavimento. Foram comparados três tipos de reforço: Concreto não aderido ( <i>unbonded concrete overlay</i> ), Concreto asfáltico convencional (HMA), Compósito cimentício de alto desempenho – ECC ( <i>Engineered Cementitious Composite</i> ).	O modelo integrado ACV-ACCV mostrou que o uso de ECC em reforços de pavimento é mais sustentável do que concreto ou HMA, pois oferece menor impacto ambiental (energia e emissões), menores custos totais de ciclo de vida, maior vida útil e menor frequência de manutenção. O estudo destaca a importância de incluir custos de usuários e efeitos de tráfego em análises de ciclo de vida, pois estes dominam os resultados econômicos.
<b>Pittenger (2011)</b>	Desenvolver uma métrica de desempenho para apoiar gestores de pavimentos aeroportuários na escolha de tratamentos de manutenção mais sustentáveis. Para isso, foram avaliados seis tratamentos comuns em aeroportos ( <i>microrrevestimento, fog seal, slurry seal, shotblasting, hot-mix asphalt</i> e <i>warm-mix asphalt</i> ), usando ACCV, consumo de materiais e padrões <i>Greenroads</i> .	Manutenção preventiva é a estratégia mais sustentável para aeroportos, reduzindo custos, aumentando a segurança e diminuindo impactos ambientais. O índice desenvolvido fornece uma ferramenta comparativa prática para gestores avaliarem alternativas de manutenção com base no tripé da sustentabilidade (econômico, ambiental e social). O microrrevestimento se destacou como o tratamento mais sustentável nas análises, mas a escolha final deve sempre considerar dados locais de desempenho, custos e restrições operacionais.
<b>Turk et al. (2014)</b>	Avaliar os impactos ambientais de dois cenários de manutenção de pavimentos asfálticos reciclados contendo alcatrão, utilizando a metodologia de ACV. A análise foi conduzida com base em 4500 toneladas de material obtido durante a reconstrução da PPD do Aeroporto de Ljubljana.	O cenário de incineração apresentou impactos significativos no consumo de energia, Potencial de Depleção Abiótica e Potencial de Aquecimento Global devido às altas necessidades de energia na planta de incineração. O cenário de reciclagem mostrou um impacto ambiental reduzido, ou até mesmo benefícios, devido à diminuição na extração e produção de agregados naturais. A reciclagem do pavimento é ambientalmente mais benéfica e economicamente viável, com uma economia de 1,5 a 2 euros por tonelada de asfalto reciclado.
<b>Anthonissen et al. (2015)</b>	Avaliar os impactos ambientais das misturas betuminosas produzidas em diferentes temperaturas (quente, morna e fria) no contexto da Bélgica, utilizando a metodologia de ACV.	Não foi possível escolher entre o asfalto quente e morno, pois o tipo de aditivo utilizado influenciou nos resultados ambientais. A produção de betume, o transporte e a energia necessária para aquecer foram os principais contribuintes para o impacto ambiental total.
<b>Shen et al. (2016)</b>	Realizar uma ACV para avaliar os impactos ambientais associados às operações de um sistema de pavimento aquecido para pátios em aeroportos.	A operação do sistema representa a maior contribuição para os impactos ambientais, devido ao alto consumo de energia para manter o pavimento aquecido e derreter neve e gelo. Embora o sistema reduza a necessidade de operações manuais de remoção de neve, o impacto ambiental global permanece significativo devido ao consumo elevado de energia.

Tabela 16 - Continuação...Estudos sobre ACV em pavimentos aeroportuários.

Referência	Objetivo	Resultados
<b>Wang <i>et al.</i> (2016)</b>	Quantificar o impacto energético e ambiental das alternativas de projeto de pavimentos de PPD usando a abordagem de ACV.	A vida útil esperada e as manutenções têm um impacto significativo na comparação entre pavimentos asfálticos e rígidos. Não foram obtidas conclusões gerais sobre a seleção do tipo de pavimento, mas os resultados alertam sobre o impacto do tipo de pavimento no consumo de energia e nas emissões de gases de efeito estufa.
<b>Chen e Wang (2018)</b>	Quantificar as emissões de gases de efeito estufa de pavimentos asfálticos que contêm asfalto reciclado, utilizando a ACV com um aspecto temporal, por meio de um estudo de caso em uma PPD.	Quatro fatores podem afetar o impacto ambiental da reciclagem de pavimentos: conteúdo de material reciclado; eficiência da mistura de ligante virgem e reciclado; teor de umidade do agregado reciclado e níveis de desempenho do pavimento. O impacto ambiental da reciclagem é superestimado se o aspecto temporal não for considerado.
<b>Liu <i>et al.</i> (2020)</b>	Comparar o desempenho econômico e ambiental de pavimentos de concreto permeável (PCP) com pavimentos de concreto convencional (CCP) ao longo de todo o ciclo de vida. A análise integrou ACCV e ACV.	A utilização de concreto permeável em pavimentos é uma alternativa sustentável ao concreto convencional, proporcionando redução de custos totais de ciclo de vida, menores impactos ambientais (energia e emissões), benefícios adicionais de drenagem e gestão de águas pluviais, que reforçam sua vantagem em contextos urbanos.
<b>Keiser <i>et al.</i> (2023)</b>	Examinar o <i>status</i> atual das aplicações de ACV na aviação, abordando as metodologias e os desafios enfrentados, por meio de uma revisão sistemática da literatura.	A revisão identificou vários desafios na aplicação de ACV na aviação, como a necessidade de dados e métodos específicos. As metodologias variam e não há padronização, o que pode dificultar a comparação e a interpretação dos resultados.
<b>Schmitt <i>et al.</i> (2025)</b>	Investigar os impactos ambientais e custos ao longo do ciclo de vida (ACV + ACCV) de diferentes estratégias de M&R de pavimentos, comparando cenários de técnicas tradicionais e alternativas que incluem reciclagem de materiais (como a reciclagem com aditivos) e outras práticas sustentáveis.	Benefícios ambientais das técnicas de reciclagem em comparação à reconstrução tradicional. A reconstrução foi a alternativa com pior desempenho ambiental. A distância de transporte influencia os resultados, especialmente nas categorias de mudança climática, uso de energia fóssil e toxicidade humana. A vida útil considerada demonstrou ser um parâmetro crítico na análise.

Os estudos sobre a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) em pavimentos aeroportuários destacam a importância dessa metodologia para a tomada de decisões sustentáveis e eficientes. A ACV fornece uma análise detalhada dos impactos ambientais e energéticos ao longo do ciclo de vida dos pavimentos e permite identificar práticas mais sustentáveis e eficientes, considerando diversos fatores como materiais, métodos de produção, manutenção e aspectos temporais, contribuindo para uma gerência de pavimentos mais informada e sustentável.

### 3 MÉTODO DE PESQUISA

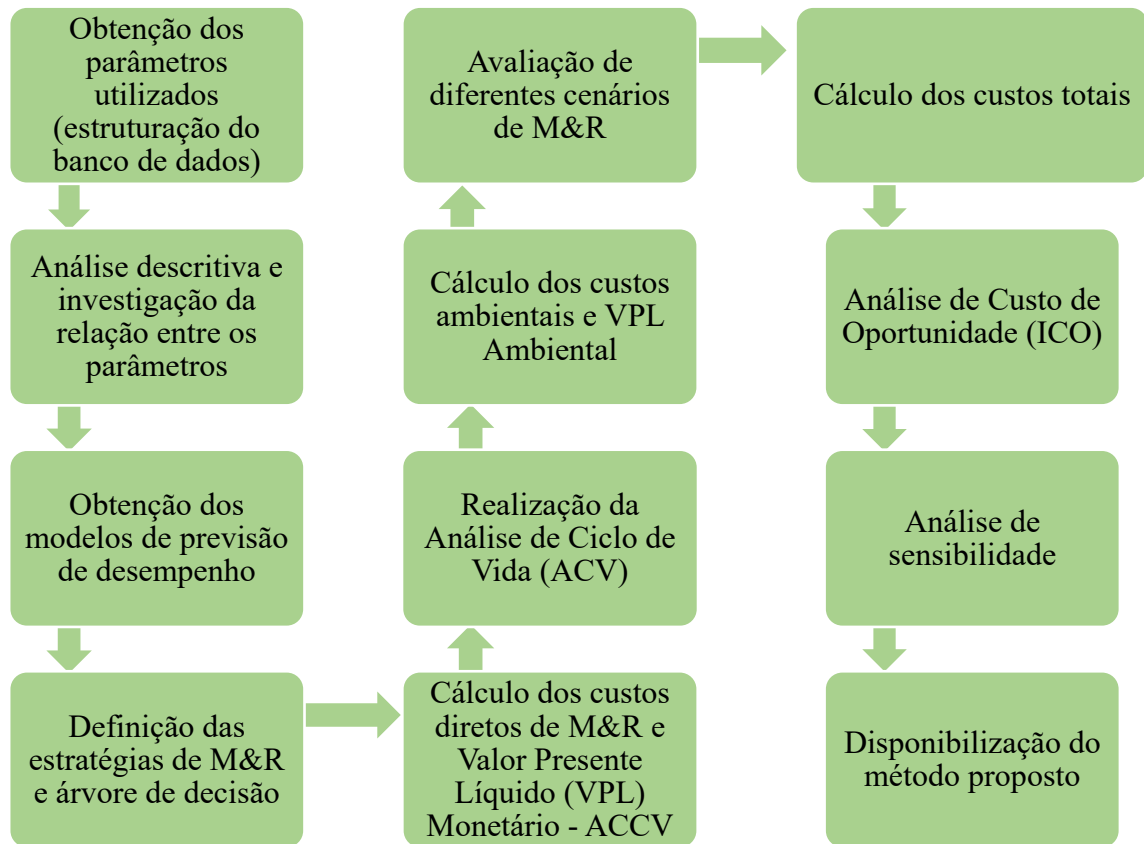
Este capítulo apresenta o método integrado proposto nesta Tese, que constitui sua principal contribuição científica. Ele foi estruturado como um sistema de apoio à decisão que considera o desempenho funcional, estrutural e de resistência à derrapagem de pistas de pouso e decolagem (PPD) às análises econômica e ambiental do ciclo de vida.

Na sequência, são descritos os materiais e os procedimentos adotados para o desenvolvimento do método integrado de ACCV e ACV. A lógica geral de desenvolvimento da pesquisa e a arquitetura do método proposto são apresentadas de forma sintética por meio de fluxogramas, que cumprem papéis distintos e complementares.

O primeiro fluxograma (Figura 4) organiza as etapas de desenvolvimento da pesquisa, evidenciando a sequência lógica das atividades realizadas. O segundo fluxograma (Figura 11) representa a arquitetura do método proposto, explicitando suas entradas, módulos de processamento, regras de decisão e saídas, de modo a caracterizá-lo como um sistema de apoio à tomada de decisão. O detalhamento de cada etapa é desenvolvido ao longo das seções subsequentes.

O método integrado proposto nesta Tese possui um núcleo decisório central, responsável por articular e sintetizar as informações provenientes dos diferentes módulos de avaliação. Esse núcleo decisório integra os resultados associados ao desempenho funcional, estrutural e a resistência à derrapagem aos custos econômicos e aos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida, operando por meio de regras implementadas em árvores de decisão e no Índice de Custo de Oportunidade (ICO). Dessa forma, o núcleo decisório constitui o elemento no qual as informações processadas ao longo do método são convertidas em subsídios objetivos para a seleção e priorização de estratégias de manutenção e reabilitação (M&R).

Figura 4 - Etapas do método de pesquisa.



### 3.1 Estruturação do banco de dados

Nesta pesquisa utilizaram-se dados de *Pavement Condition Index* (PCI), de coeficiente de atrito e de macrotextura, além de informações estruturais do *Cumulative Damage Factor* (CDF) do pavimento de uma PPD brasileira. Os dados de PCI, coeficiente de atrito e macrotextura foram obtidos por meio de 88 relatórios técnicos disponibilizados pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). Os relatórios foram obtidos em formato .pdf e digitados no *software* Microsoft Excel® 2019. O CDF foi obtido por meio de uma análise estrutural da PPD no *software* FAARFIELD. A Tabela 17 apresenta a quantidade de relatórios disponibilizados pela ANAC e os respectivos períodos analisados.

Tabela 17 - Relatórios fornecidos pela ANAC.

Parâmetro	Quantidade de Relatórios	Período
PCI	04	2018, 2021, 2022 e 2023
Coeficiente de atrito	47	2014 a 2023
Macrotextura	37	2014 a 2023

Entre uma medição e outra do coeficiente de atrito e da macrotextura, ocorreram as manutenções periódicas de remoção do acúmulo de borracha. Em 2020 ocorreu uma reabilitação do revestimento asfáltico da PPD, na qual houve a fresagem do revestimento asfáltico existente e a substituição por um novo revestimento de Concreto Asfáltico modificado por polímero.

O PCI foi determinado conforme ASTM (2020). O coeficiente de atrito foi medido com o equipamento *Grip Tester* a 65 km/h, a 3m e 6m do eixo da PPD, nos lados direito (D) e esquerdo (E), a cada 100 m (ANAC, 2023a). A macrotextura foi medida por meio do ensaio de mancha de areia, a 3m do eixo da PPD, alternadamente para os lados direito (D) e esquerdo (E), a cada 100 m (ANAC, 2023a).

Os dados de PCI, do coeficiente de atrito e da macrotextura foram analisados no *software* Microsoft Excel® (2019), com análises estatísticas descritivas e gráficas. A análise do coeficiente de atrito considerou a distância do eixo da PPD e o lado de medição (D e E) e a macrotextura foi segmentada por terços de pista (1º, 2º e 3º terço), avaliando o comportamento das condições de resistência à derrapagem ao longo do tempo (2014-2023).

### **3.2 Relação entre o PCI e os parâmetros de resistência à derrapagem**

Para analisar a relação entre o PCI e os parâmetros de resistência à derrapagem utilizaram-se os dados referentes aos anos de 2018, 2021, 2022 e 2023. Os dados de coeficiente de atrito e de macrotextura foram agrupados nas mesmas seções onde foram determinados os valores de PCI. Para isso, foram usados valores de PCI referentes às seções centrais da PPD (20 m de largura e comprimento variável) e valores médios de coeficiente de atrito e de macrotextura para corresponder a área de cada seção.

Para o coeficiente de atrito, inicialmente, realizou-se um teste de hipótese, para saber se existia uma diferença estatisticamente significativa entre os dados medidos para os lados direito e esquerdo. Os resultados obtidos mostraram que existe diferença entre os valores de coeficiente de atrito medidos nos lados direito ou esquerdo da PPD. Em relação as medições realizadas a 3m e a 6m do eixo da PPD, também foi identificada uma diferença estatisticamente significativa nos resultados. Dessa forma, os dados de coeficiente de atrito foram analisados de forma separada, por lado (direito – D e esquerdo – E) e por distância em relação ao eixo da PPD.

Para a macrotextura, não foram encontradas diferenças estatisticamente significativas nos dados medidos nos lados D ou E, assim eles não foram separados por lado na análise estatística. Além disso, verificou-se, também, a normalidade dos dados, sendo rejeitada a

hipótese nula de que seguem uma distribuição normal. Dessa forma, a análise de correlação foi realizada utilizando a correlação de *Spearman*, que é um teste não paramétrico.

### 3.3 Modelo de previsão do PCI

Em 2018 foi implementado um Sistema de Gerência de Pavimentos Aeroportuários (SGPA) na PDD estudada, e, desde então, vêm sendo realizados levantamentos anuais do PCI, que são utilizados para classificar a condição do pavimento (ASTM, 2020). Os relatórios obtidos informam que foram estimadas curvas médias de evolução do PCI de acordo com os levantamentos realizados na PPD entre os anos de 2018 e 2023. A Tabela 18 apresenta um decréscimo médio anual esperado em pontos de PCI, caso não se realize obras de reabilitação na PPD.

Tabela 18 - Redução média estimada do PCI para pavimentos flexíveis.

<b>Classificação</b>	<b>Redução do PCI 2021 – 2022</b>	<b>Redução do PCI 2022 – 2023</b>	<b>Redução do PCI 2023 – 2024</b>
<b>Excelente</b>	7,9	4,6	4,5
<b>Bom</b>	4,6	3,2	3,0
<b>Regular</b>	2,1	1,2	1,2
<b>Ruim</b>	6,9	0,0	0,0
<b>Muito Ruim</b>	10,4	0,0	0,0
<b>Péssimo</b>	9,2	0,0	0,0
<b>Ruptura</b>	0,0	0,0	0,0

O PCI crítico de manutenção é igual a 70 e o PCI crítico de serviço 40 (ANAC, 2017). A definição do PCI crítico para cada família de seções da PPD é uma atividade de customização essencial dentro de um SGPA, pois possibilita obter planejamentos de M&R eficientes e otimizados. Os valores de PCI críticos encontram-se, normalmente, em uma faixa que varia entre 55 e 70 (ASTM, 2020).

Valores de PCI entre 70 e 100 podem ser considerados Bom, entre 55 e 70, Regular e 0 a 50, Ruim (ASTM, 2020). Com base nesses valores, optou-se por reduzir as sete classificações do PCI (Excelente, Bom, Regular, Ruim, Muito Ruim, Péssimo, Ruptura) para cinco classes, sendo Bom, Regular, Ruim, Muito Ruim e Péssimo. A Tabela 19 apresenta a deterioração do PCI para cada classificação customizada adotada neste estudo, de modo a estimar a evolução do PCI caso não se realize obras de grande porte. A taxa de deterioração do PCI foi calculada por meio da média da deterioração dos anos anteriores (Tabela 18).

Tabela 19 - Deterioração do PCI adotada neste estudo.

Classificação	Classificação do PCI	Redução do PCI
<b>Bom</b>	100-70	4,64
<b>Regular</b>	70-55	1,50
<b>Ruim</b>	55-40	2,30
<b>Muito Ruim</b>	40-25	3,47
<b>Péssimo</b>	25-0	3,07

Com base na deterioração da Tabela 19, o PCI futuro pode ser determinado de acordo com a Equação 8. O modelo foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação *Python* versão 3.10.6 e o *software Visual Studio Code* (VSCoDe) com o ambiente de programação *Jupyter Notebook*. O código está disponível no Apêndice A e um exemplo de cálculo do PCI com o modelo desenvolvido, no Apêndice B. Foram adotados os períodos de 20, 30 e 40 anos para previsão dos valores futuros de PCI.

$$PCI(t) = PCI_0 - \sum_{i=1}^t D(\text{classificação}) \quad (8)$$

Onde:

$PCI_0$  = valor inicial do PCI no ano de referência, nesta pesquisa, 2023;

$t$  = número de anos até o ano de referência;

$D(\text{classificação})$  = média de deterioração associada à classificação  $i$  do PCI.

Diferentes abordagens para desenvolver modelos de previsão do PCI foram realizadas, como modelos de regressão, modelos polinomiais de segundo grau e modelos de séries temporais, como o *AutoRegressive Integrated Moving Average* (ARIMA) e o *AutoRegressive Integrated Moving Average eXogenous* (ARIMAX). No entanto, devido à disponibilidade limitada de dados (quatro anos) e a pouca variabilidade nos dados, nenhuma das técnicas adotadas mostrou-se adequada, motivou pelo qual optou-se pelo modelo simples de deterioração. Vale ressaltar que a periodicidade de medição do PCI é anual. A maior taxa de redução observada na classe Bom deve-se à agregação das classes Bom e Excelente quando as classificações foram reorganizadas das sete categorias propostas pela ASTM (2020) para as cinco classes adotadas nesta pesquisa.

### 3.4 Modelo de previsão do coeficiente de atrito

Diversas abordagens poderiam ser empregadas para a previsão dos parâmetros de resistência à derrapagem, incluindo modelos estatísticos tradicionais de séries temporais e técnicas de inteligência artificial. Entretanto, considerando a natureza não linear, dinâmica e potencialmente não estacionária dos dados de coeficiente de atrito e macrotextura, influenciados por fatores operacionais, climáticos e intervenções de manutenção, optou-se pela utilização de uma rede neural recorrente do tipo *Gated Recurrent Unit* (GRU) nesta pesquisa.

A GRU é particularmente adequada para problemas de séries temporais, pois possui mecanismos internos de atualização e esquecimento que permitem capturar dependências temporais de curto e médio prazo de forma eficiente. Além disso, em comparação com outras arquiteturas recorrentes, como a LSTM, a GRU apresenta uma estrutura mais simples, com menor número de parâmetros, o que reduz o custo computacional e o risco de sobreajuste, especialmente em bases de dados com tamanho limitado. Estudos comparativos indicam que a GRU pode alcançar desempenho preditivo semelhante ao da LSTM, porém com maior estabilidade e menor tempo de processamento, justificando sua escolha para este estudo.

Para a construção do modelo de coeficiente de atrito, foram selecionados os dados medidos a 3 m do eixo da PPD, para ambos os lados direito (D) e esquerdo (E). O modelo foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação *Python* versão 3.10.6 no *software* VSCode com o ambiente de programação *Jupyter Notebook*. Para isso, foram usadas as bibliotecas *numpy*, *pandas*, *matplotlib*, *statsmodels*, *sklearn*, *keras* e *tensorflow*. Também foi utilizado o *seed* igual a 42 na opção *random* para garantir a reprodutibilidade do modelo. O modelo desenvolvido é determinístico. Os dados de coeficiente de atrito foram organizados de acordo com a data de medição, no formato aaaa-mm-dd. Além do coeficiente de atrito, foram obtidas outras variáveis para tentar explicar o seu comportamento. Essas variáveis, inicialmente, foram:

- a) Distância na PPD (discreta, medida a cada 100 m);
- b) Lado de medição (binária, 0 para o lado esquerdo e 1 para o lado direito);
- c) Idade do revestimento asfáltico em meses e anos (discreta);
- d) Número de operações mensais de aeronaves na PPD (discreta);
- e) Precipitação mensal em mm, obtida por meio do Portal da Divisão de Pesquisa do Instituto de Controle do Espaço Aéreo (ICEA, 2024) (contínua);
- f) Temperatura média do ar mensal em °C, obtida por meio de dados do ICEA (2024) (contínua);

- g) Temperatura do ar no dia da medição em °C, obtida por meio dos relatórios de coeficiente de atrito (contínua);
- h) Umidade relativa do ar no dia da medição em %, obtida por meio dos relatórios de coeficiente de atrito (contínua);
- i) Ocorrência de remoção de borracha na PPD (binária, 1 para remoção e 0 para não remoção);
- j) Tempo decorrido desde a última remoção de borracha da PPD em meses e anos (contínua);

O número de operações de aeronaves foi obtido na página eletrônica da ANAC, no histórico de voos, disponível em ANAC (2024b). Para remoção do acúmulo de borracha, considerou-se que houve remoção de borracha na PPD se a data da remoção ocorreu, pelo menos, 30 dias antes da medição de coeficiente de atrito.

Para reduzir o número de variáveis que seriam utilizadas no modelo e avaliar a importância relativa de cada variável, foi realizada uma Análise de Componentes Principais (ACP). A ACP destacou que nove componentes principais seriam suficientes para explicar 95% da variância nos dados (Figuras 5 e 6).

Figura 5 - Análise de Componentes Principais.

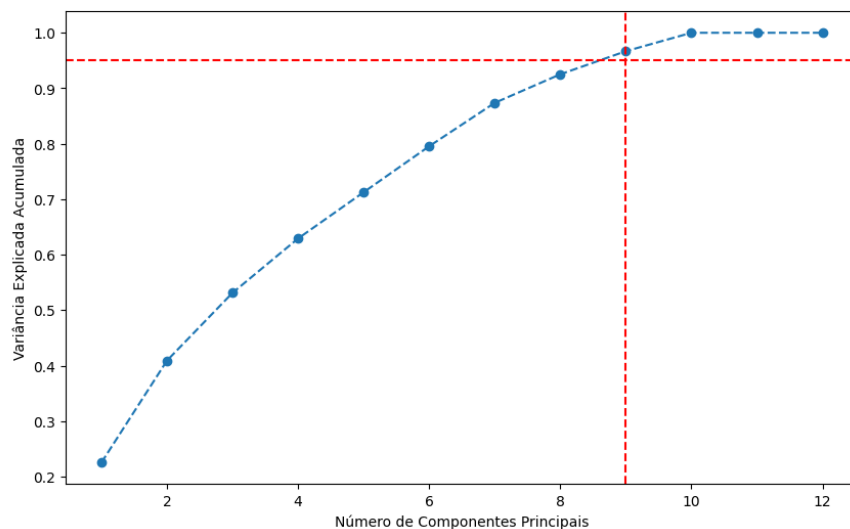
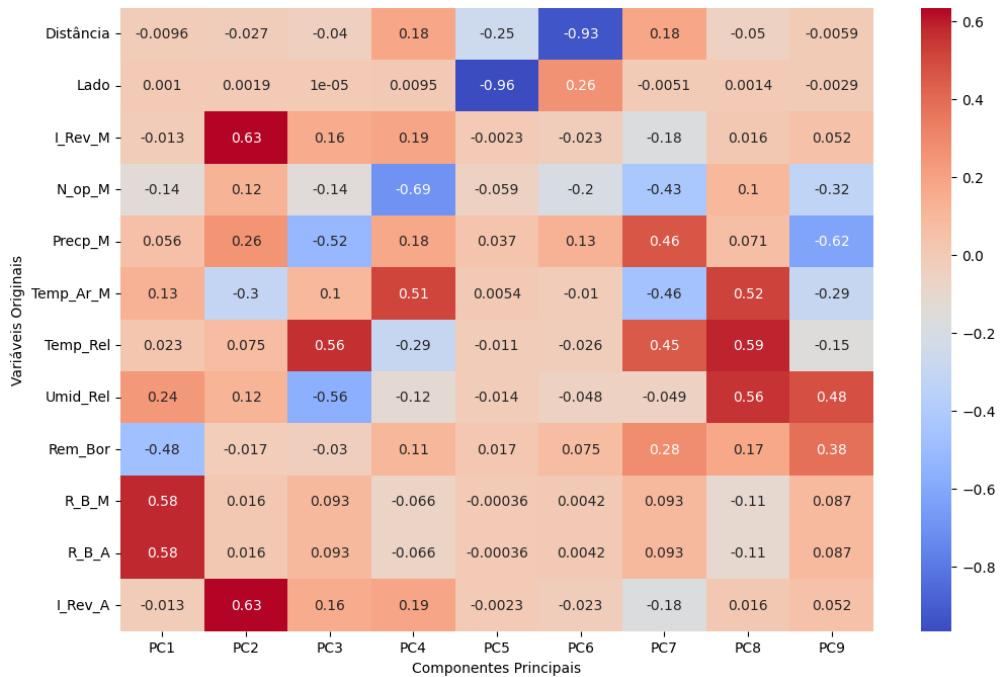


Figura 6 - Carga dos Componentes Principais.



Assim, observando as Figuras 5 e 6, as variáveis distância, lado, idade do revestimento em meses (I\_Rev\_M), número de operações mensais de aeronaves (N\_op\_M), precipitação mensal (Precp\_M), temperatura e umidade relativa do ar no dia da medição, ocorrência de remoção de borracha (Rem\_Bor) e tempo decorrido desde a última remoção de borracha em meses (R\_B\_M) seriam selecionadas para compor o modelo. No entanto, verificou-se que algumas dessas variáveis possuíam altas correlações, por exemplo, as variáveis climáticas. Portanto, optou-se por usar apenas a precipitação mensal, pois, dentre as variáveis referentes ao clima, é a que possui maior variabilidades nos dados. Por fim, a Tabela 20 apresenta um exemplo do banco de dados com as variáveis utilizadas para o modelo de coeficiente de atrito.

Tabela 20 - Exemplo do banco de dados de coeficiente de atrito.

Data	Distância	Lado	I_Rev_M	N_op_M	Precp_M	Rem_Bor	R_B_M	ATRITO
2014-02-23 00:00:00	100	0	17	3820	118,8	0	14,7	0,65
2014-02-23 00:00:00	100	1	17	3820	118,8	0	14,7	0,64
2014-02-23 00:00:00	200	0	17	3820	118,8	0	14,7	0,72
.	.	.	.	.	.	.	.	.

O banco de dados é composto por 9 colunas e 1.765 linhas, sendo 1.764 observações. Todas as variáveis da Tabela 20 foram usadas como *features* e o coeficiente de atrito também

foi usado como *target*. No caso de usar o coeficiente de atrito como *feature* e *target*, isso pode ser feito, pois, a rede GRU utiliza o coeficiente de atrito passado para prever o coeficiente atrito futuro. As demais variáveis podem ser adicionadas para ajudar a explicar o seu comportamento e realizar a previsão.

Com as variáveis definidas, os dados foram divididos em dois conjuntos distintos, destinados a treinamento da rede e teste do modelo. O conjunto de treino possui 80% dos dados e o conjunto de teste 20%. Após a divisão dos conjuntos de treino e teste, os dados de treino foram normalizados. Para decidir qual tipo de normalização seria utilizada, foi realizado um *GridSearch*, no qual foram testados os normalizadores *MiniMax*, *StandartScalar* e *RobusterScaler*. O *GridSearch* também foi utilizado para decidir outros hiperparâmetros da rede GRU, como o número de épocas (50, 100, 200), o tamanho do lote ou *batch size* (16, 32, 64) e o otimizador utilizado (Adam, Nadam, RMSProp, SGD, Adagrad).

A arquitetura inicial do modelo possuía uma camada GRU e uma camada densa para a saída do modelo. Verificou-se também a necessidade de uma camada GRU adicional. Para a definição dos demais hiperparâmetros foi utilizada uma otimização bayesiana. Essa otimização foi responsável por definir o número de unidades em cada camada GRU, a taxa de *dropout* e a taxa de aprendizado do otimizador. A otimização bayesiana busca encontrar os melhores hiperparâmetros construindo um modelo probabilístico para prever quais configurações de parâmetros são mais promissoras, ao invés de testar todas as combinações ou escolher aleatoriamente. Isso economiza tempo e recursos computacionais (Silva, 2020).

Como função de perda foi usada a *Huber Loss*, pois é uma função mais robusta para lidar com dados que possuem muitos *outliers*. Ela combina as vantagens da função de perda do erro quadrático médio ou *Mean Squared Error* (MSE) e do erro absoluto médio ou *Mean Absolute Error* (MAE), ajustando-se entre essas duas funções, dependendo do erro. Quando o erro absoluto é pequeno, a função se comporta como o MSE e quando o erro absoluto é grande, a função se comporta como o MAE.

Vale destacar algumas observações importantes no treinamento do modelo, como a técnica usada para evitar *overfitting* e melhorar o desempenho computacional, denominada *EarlyStopping*. Ela é utilizada para parar o treinamento de um modelo automaticamente quando não houver mais melhorias significativas em uma métrica, como a função de perda, ajudando a prevenir *overfitting*, melhorar a eficiência de treinamento e garantir que o modelo pare no ponto de melhor desempenho. Além disso, o *time step* (número de linhas de dados utilizado para prever o próximo valor) foi igual a 42, que corresponde aos dados de uma medição de coeficiente de atrito. Ou seja, correspondem aos dados de um relatório.

Outra observação importante diz respeito ao uso da tendência dos dados de coeficiente de atrito. Usando a função *seasonal\_decompose*, da biblioteca *statsmodels*, foi extraída a tendência dos dados de coeficiente de atrito e usada na modelagem. Isso foi feito pois, incorporar a tendência dos dados em um modelo GRU ajuda a capturar padrões de longo prazo, reduzir o impacto de ruído de curto prazo e melhorar a capacidade do modelo de fazer previsões generalizáveis e precisas.

Para o treinamento do modelo de coeficiente de atrito foi utilizada uma validação cruzada com *TimeSeriesSplit*, que é uma técnica de validação para séries temporais. A validação cruzada com *TimeSeriesSplit* não embaralha o conjunto de dados, respeitando a ordem temporal. Ela funciona dividindo o conjunto de dados em divisões sequenciais, ou *splits*, de modo que, a cada divisão, o modelo seja treinado com uma sequência crescente de dados passados e validado em uma sequência futura. Isso simula como o modelo irá prever os dados no mundo real. Foram usados cinco *splits* para o treinamento e validação do modelo de coeficiente de atrito. A normalização foi realizada em cada *split* da validação cruzada para evitar vazamento dos dados.

Para avaliar a qualidade do modelo foram utilizadas as métricas MSE, MAE, raiz do erro quadrático médio ou *Root Mean Squared Error* (RMSE) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Além disso, foram utilizados alguns gráficos para visualização dos resíduos e valores previstos *versus* valores reais. Foram adotados períodos de previsão de 20 anos (240 meses), 30 anos (360 meses) e 40 anos (480 meses) e os resultados das previsões foram salvos em arquivos .csv.

Para realizar a previsão do coeficiente de atrito futuro, considerou-se que o número de operações de aeronaves crescerá a uma taxa linear de 3,45% ao ano, adotada do estudo de Chaves e Oliveira (2024), e adicionou-se um ruído gaussiano para considerar flutuações não previstas nos dados. Para a precipitação, utilizou-se a média histórica e o desvio padrão e um ruído gaussiano de 5%. Para a remoção de borracha, foi adotado a ocorrência de remoção de borracha da PPD a cada 180 dias (6 meses) (ANAC, 2023a). O código completo do modelo de coeficiente de atrito pode ser encontrado no Apêndice C.

### 3.5 Modelo de previsão da macrotextura

A construção do modelo de macrotextura seguiu a mesma lógica usada para o modelo de coeficiente de atrito. Desse modo, foram usadas as mesmas bibliotecas *numpy*, *pandas*, *matplotlib*, *statsmodels*, *sklearn*, *keras* e *tensorflow*, com linguagem de programação *Python*

versão 3.10.6. O modelo foi desenvolvido no *software* VSCode com o ambiente de programação *Jupyter Notebook*. Foi utilizado o *seed* igual a 42 na opção *random* para garantir a reprodutibilidade do modelo.

Os dados para construção do modelo com rede GRU foram organizados conforme a data de medição da macrotextura, no formato aaaa-mm-dd. Inicialmente, foram obtidas as variáveis:

- a) Distância na PPD (discreta, medida a cada 100 m);
- b) Idade do revestimento asfáltico em meses (discreta);
- c) Número de operações mensais de aeronaves na PPD (discreta);
- d) Precipitação mensal em mm, obtida por meio do ICEA (2024) (contínua);
- e) Temperatura média do ar mensal em °C, obtida por meio do ICEA (2024) (contínua);
- f) Ocorrência de remoção do acúmulo de borracha na PPD (binária, 1 para remoção e 0 para não remoção);
- g) Tempo decorrido desde a última remoção de borracha da PPD em meses (contínua).

O número de operações de aeronaves foi obtido por meio do histórico de voos na página eletrônica oficial da ANAC (ANAC, 2024b). Para remoção de borracha, considerou-se, assim como ocorreu para o coeficiente de atrito, que ocorreu remoção de borracha na PPD se a remoção foi datada, pelo menos, 30 dias antes da medição de macrotextura.

Também foi realizada uma Análise de Componentes Principais (ACP) para selecionar as variáveis que seriam utilizadas no modelo de macrotextura. Verificou-se que seis componentes principais seriam suficientes para explicar 95% da variância nos dados (Figuras 7 e 8).

Figura 7 - ACP da macrotextura.

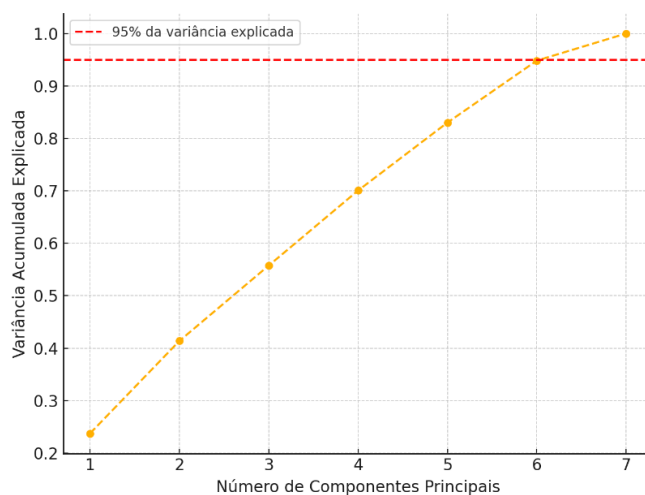
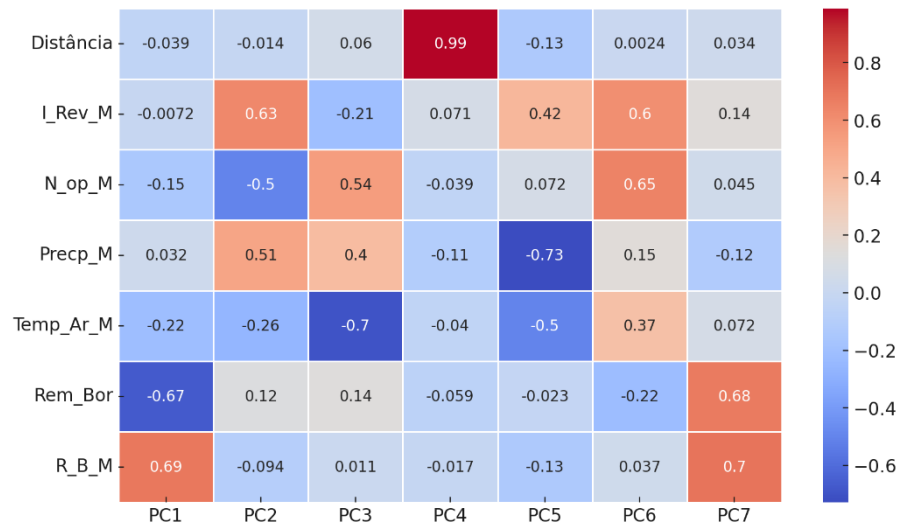


Figura 8 - Carga dos Componentes Principais da macrotextura.



Das Figuras 7 e 8, é possível perceber que as variáveis tempo decorrido desde a última remoção de borracha em meses, ocorrência de remoção de borracha na PPD, idade do revestimento em meses, temperatura do ar mensal, distância na PPD, precipitação mensal e número de operações mensais de aeronaves são as que possuem maior carga e deveriam ser selecionadas para compor o modelo. No entanto, ao incluir todas essas variáveis, o modelo não performou bem. Decidiu-se, então, adotar o método *stepwise* inserindo e retirando as variáveis do modelo e avaliando a sua performance. Observou-se que o modelo performou melhor sem as variáveis climáticas, temperatura e precipitação, pois essas variáveis estavam muito correlacionadas. Portanto, optou-se por usar apenas as variáveis tempo decorrido desde a última remoção de borracha em meses (R\_B\_M), ocorrência de remoção de borracha na PPD (Rem\_Bor), idade do revestimento em meses (I\_Rev\_M), distância na PPD e número de operações mensais de aeronaves (N\_op\_M) para o modelo de macrotextura. A Tabela 21 apresenta um exemplo do banco de dados utilizado.

Tabela 21 - Exemplo do banco de dados de coeficiente de macrotextura.

Data	Distância	I_Rev_M	N_op_M	R_B_M	Rem_Bor	PM
2014-02-23	100	17	3820	14,7	0	0,62
2014-02-23	200	17	3820	14,7	0	0,64
2014-02-23	300	17	3820	14,7	0	0,81

O banco de dados é composto por 7 colunas e 777 linhas contendo dados. Todas as variáveis da Tabela 20 foram usadas como *features* e a profundidade da macrotextura (PM) também foi usada como *target*. É possível usar PM como *feature* e *target* porque a rede GRU

utiliza a PM passada para prever a PM futura. As demais variáveis podem ser adicionadas para ajudar a prever a profundidade da macrotextura.

Os dados foram separados de modo que 80% correspondessem ao conjunto de treino e 20% ao conjunto de teste. Também foi realizado um *GridSearch* para definir o tipo de normalizador que seria utilizado (*MiniMax*, *StandartScalar*, *RobusterScaler*), o número de épocas (50, 100, 200), o *batch size* (16, 32, 64) e o otimizador (Adam, Nadam, RMSProp, SGD, Adagrad). Foram testadas arquiteturas com um e duas camadas GRU e uma camada densa para a saída do modelo. A normalização foi realizada no conjunto de treino e escalada para o conjunto de teste.

Para a definição do número de unidades em cada camada GRU, taxa de *dropout* e taxa de aprendizado, foi utilizada uma otimização bayesiana. Como função de perda, foi usada a *Huber Loss*. Foi utilizado *EarlyStopping* para prevenir *overfitting* e *time step* (número de linhas de dados utilizado para prever o próximo valor) igual a 21, que corresponde aos dados de um relatório de macrotextura.

Na construção do modelo de previsão da macrotextura, foi utilizada a mesma técnica de extração da tendência dos dados que foi usado no modelo de coeficiente de atrito, com a função *seasonal\_decompose*, da biblioteca *statsmodels*. A validação cruzada foi realizada utilizando o *TimeSeriesSplit*, com três *splits* para o treinamento e validação do modelo. A validação do modelo foi feita com os dados do conjunto de treino.

A qualidade do modelo foi avaliada de acordo com as métricas MSE, MAE, RMSE e  $R^2$  no conjunto de teste final, que corresponde aos dados que a rede não teve acesso durante a etapa de treinamento. Foram gerados gráficos para visualização dos resíduos e valores previstos *versus* valores reais. Foram adotados períodos de previsão de 20 anos (240 meses), 30 anos (360 meses) e 40 anos (480 meses) e os resultados das previsões foram salvos em arquivos .csv.

Para previsão da macrotextura futura, considerou-se que o número de operações de aeronaves crescerá a uma taxa linear de 3,45% ao ano (Chaves e Oliveira, 2024). A essa taxa de crescimento, foi adicionado um ruído gaussiano de 5% para incorporar variabilidade nos dados, simulando flutuações inesperadas que podem ocorrer ao longo do tempo. A ocorrência de remoção de borracha da PPD a cada 180 dias (6 meses) (ANAC, 2023a). O código completo para o modelo de macrotextura pode ser encontrado no Apêndice D.

### 3.6 Avaliação Estrutural do Pavimento

A PPD estudada possui 2.755 m de extensão e 45 m de largura e pode ser dividida em dois trechos, sendo o primeiro com 1.600 m e o segundo com 1.155 m de extensão. O primeiro trecho é composto por uma camada de revestimento de Concreto Asfáltico (CA) de 30 cm, uma camada de base de macadame hidráulico de 28 cm e uma camada de sub-base de solo pedregulhoso de 28 cm, sobre o solo natural. O segundo trecho possui uma camada de revestimento de CA de 38 cm, mantendo-se as mesmas espessuras do primeiro para as subcamadas (Chaves e Oliveira, 2024). Essa divisão em dois trechos foi adotada apenas na etapa de avaliação estrutural, pois, devido à diferença na espessura do revestimento, foram necessários procedimentos distintos para a avaliação e para o cálculo do CDF.

O processo de retroanálise das bacias de deflexão normalizadas foi realizado para obtenção dos módulos de resiliência (MR) das camadas do pavimento da mesma PPD deste estudo (Chaves e Olivera, 2024). A deflexão foi obtida por meio de um levantamento com o *Heavy Weight Deflectometer* (HWD) realizado em 2020. Dessa forma, foram usados, nesta pesquisa, os módulos característicos obtidos por Chaves e Oliveira (2024) no *software* BAKFAA (v.2.1.0.1), conforme Tabela 22.

Tabela 22 - Módulo de Resiliência.

Camada	MR (MPa)	Espessura (cm) 1º trecho	Espessura (cm) 2º trecho
<b>Revestimento</b>	4084	30	38
<b>Base</b>	812	28	28
<b>Sub-base</b>	669	28	28
<b>Subleito</b>	450	-	-

Fonte: Adaptado de Chaves e Oliveira (2024).

Com base nos dados da Tabela 22, realizou-se a análise estrutural da PPD no *software* FAARFIELD 2.1.1, com o cálculo do CDF. Adotou-se o *mix* de aeronaves (Tabela 23), conforme definido por Chaves e Oliveira (2024), e uma taxa de crescimento linear de 3,45% ao ano para o número de operações.

Tabela 23 - *Mix* de aeronaves.

Aeronaves	Operações anuais	<i>Mix</i> (%)
<b>Boeing 737-800</b>	6.701	26,70
<b>Airbus A320-200</b>	5.775	23,01
<b>Airbus A321-200</b>	4.459	17,76
<b>Embraer E190</b>	2.034	8,11
<b>Boeing 737-700</b>	1.248	5,97
<b>Airbus A330-200</b>	996	4,39
<b>Boeing 737-400</b>	394	1,57
<b>Airbus A319-100</b>	202	1,53
<b>Embraer E195</b>	140	1,06

Fonte: Adaptado de Chaves e Oliveira (2024).

O valor de CDF varia de 0 a 1. Nesta pesquisa, considerou-se que CDF até 0,85 seria adequado, enquanto estruturas com CDF superior a 0,85 seriam não adequadas. Esse valor foi escolhido conforme ANAC (2020b), que recomenda que o CDF seja superior a 0,15 e inferior a 1,00. Valores de CDF inferiores a 0,15 indicam que a estrutura do pavimento pode estar superdimensionada para as cargas e o *mix* de aeronaves em operação, enquanto valores de CDF superiores a 1,00, subdimensionada (ANAC, 2020b). O cálculo do CDF foi realizado no modo *life* do *FAARFIELD* 2.2.1 para determinar o Sub CDF (CDF no topo do subleito), o HMA CDF (CDF no revestimento) e a *life* ou vida útil remanescente do pavimento (ANAC, 2022). Foram considerados os horizontes de projeto de 20 anos, 30 anos e 40 anos.

### 3.7 Definição das Estratégias de M&R

As estratégias de M&R utilizadas nesta pesquisa foram definidas baseando-se nos estudos de Oliveira (2009), Oliveira (2016) e Souza (2024), e podem ser encontradas na Tabela 24. Os custos unitários dos serviços de M&R selecionados podem ser encontrados na Tabela 40 no Apêndice 1, em real e dólar americano.

Tabela 24 - Estratégias de M&R.

<b>Geral</b>	<b>Específica</b>
<b>NÃO FAZER NADA</b>	Não necessita de intervenção.
<b>MANUTENÇÃO PREVENTIVA</b>	Microrrevestimento asfáltico.
<b>MANUTENÇÃO CORRETIVA</b>	Recapamento ou Remoção do acúmulo de borracha.
<b>REFORÇO</b>	Pintura de ligação e adição de camada de Concreto Asfáltico (CA).
<b>RECONSTRUÇÃO DO REVESTIMENTO*</b>	Fresagem e remoção do revestimento existente com substituição por um revestimento novo em CA.
<b>RECONSTRUÇÃO</b>	Demolição da estrutura do pavimento com reconstrução da base e sub-base e novo revestimento asfáltico com CA.

\*Usada apenas na avaliação de cenários.

Devido a inexistência de um sistema de custos específicos para obras e serviços relacionados à infraestrutura aeroportuária, os custos unitários foram obtidos utilizando dados do Sistema de Custos Referenciais de Obras do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (SICRO/DNIT), com a tabela de referência de abril de 2024 (DNIT, 2024). O custo dos materiais asfálticos foi obtido da Agência Nacional de Petróleo (ANP), em Brasil (2024a), também usando como referência o mês de abril de 2024. A composição dos serviços para obtenção do custo unitário e horário foi realizada no *software* OrçaFascio. Os custos unitários

foram convertidos para dólar americano usando a cotação média de 2014 a 2023, obtida de acordo com o Banco Central do Brasil (Brasil, 2024b).

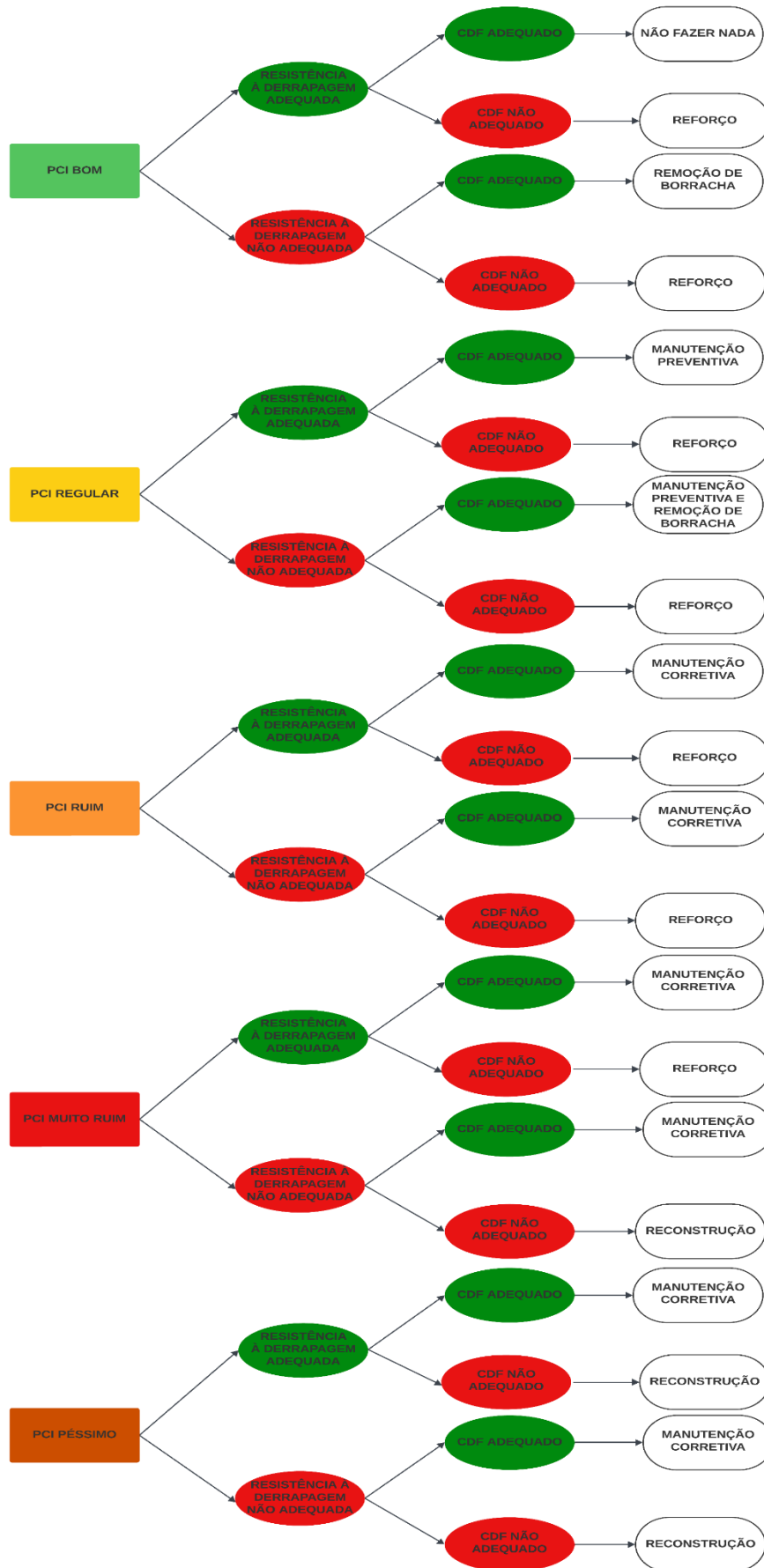
### 3.8 Árvore de decisão

Para a escolha de qual intervenção de M&R a ser aplicada, utilizou-se o método da árvore de decisão. Para o PCI, foram usadas as classes Bom, Regular, Ruim, Muito Ruim e Péssimo. Para as condições de resistência à derrapagem, foi considerado que, se o coeficiente de atrito for menor do que 0,70 ou a macrotextura for menor do que 0,80 mm, a resistência à derrapagem é não adequada, caso contrário, é adequada (Maia *et al.*, 2025). Para o CDF, considerou-se que CDF maior do que 0,85 é considerado não adequado.

A árvore de decisão para as estratégias de M&R está apresentada na Figura 9. Para as classes de PCI Ruim, Muito Ruim e Péssimo, o coeficiente de atrito e a macrotextura devem possuir valores iguais ou superiores aos limites especificados para a condição de resistência adequada após as intervenções na PPD.

O núcleo decisório do método integrado proposto é responsável por integrar os resultados dos diferentes módulos de avaliação, articulando indicadores funcionais, estruturais, de resistência à derrapagem, econômicos e ambientais por meio da árvore de decisão e do Índice de Custo de Oportunidade (ICO). Esse núcleo converte as informações processadas ao longo do método em subsídios objetivos para a tomada de decisão em manutenção e reabilitação (M&R).

Figura 9 - Árvore de decisão.



### 3.9 Análise de Custo do Ciclo de Vida

A ACCV consistiu na determinação dos custos diretos de M&R ao longo do tempo, utilizando o indicador Valor Presente Líquido (VPL), as espessuras das camadas da PPD de estudo, os custos dos serviços da Tabela 45 (Apêndice 1) e a área de cada seção da qual foi obtido o PCI (Tabela 46 no Apêndice 2). Os custos foram calculados para os horizontes de 20 anos, 30 anos e 40 anos. A abordagem utilizada foi uma ACCV determinística.

Walls e Smith (1998) recomendam uma taxa de desconto variando entre 3% e 5% ao ano (a.a). No entanto, segundo Nascimento e Silva (2021), em países em desenvolvimento, como o Brasil, as taxas de desconto usuais podem alcançar valores mais próximos dos 10% ou 12%. Nascimento e Silva (2021) utilizaram em seu estudo a taxa de desconto de 10% a.a. para uma PPD brasileira e Carneiro *et al.* (2023), por sua vez, 7% a.a. para um PPD no Nordeste do Brasil. O Ministério da Economia brasileiro recomenda a taxa social de desconto de 8,5% a.a. para investimentos em infraestrutura (Brasil, 2020). Assim, adotando-se uma média entre essas recomendações, utilizou-se uma taxa de desconto de 8,5% a.a. para a PPD deste estudo. O VPL resultante foi denominado VPL Monetário e está relacionado aos custos de M&R. O código para o cálculo dos custos de M&R pode ser encontrado no Apêndice E e foi desenvolvido usando o *software* VSCode, na linguagem de programação *Python* versão 3.10.6 e no ambiente de programação *Jupyter Notebook*.

### 3.10 Análise de Ciclo de Vida

A avaliação dos impactos ambientais das estratégias de manutenção e reabilitação (M&R) foi realizada por meio de uma Análise de Ciclo de Vida (ACV), conforme as diretrizes das normas ABNT (2009<sup>a</sup>) e ABNT (2009b).

#### 3.10.1 Definição de objetivo

O objetivo da ACV foi quantificar e monetizar os impactos ambientais associados às diferentes estratégias de manutenção e reabilitação aplicadas à pista de pouso e decolagem (PPD), permitindo sua incorporação à Análise de Custo do Ciclo de Vida (ACCV) por meio do cálculo do Valor Presente Líquido (VPL) Ambiental.

### 3.10.2 Definição de escopo

O escopo da análise considerou as intervenções de M&R aplicáveis ao pavimento aeroportuário, incluindo remoção de borracha, manutenção preventiva, manutenção corretiva, reforço e reconstrução do pavimento.

A modelagem foi realizada utilizando o *software* SimaPro versão 10.2.0 Demo, que permite modelar sistemas complexos e avaliar impactos ambientais ao longo do ciclo de vida. Para a construção do inventário foram utilizados dados da base Ecoinvent versão 3.0, que contém processos relacionados à produção de materiais, consumo de energia e transporte utilizados na infraestrutura e construção.

A avaliação de impactos ambientais foi realizada utilizando o método ReCiPe 2016 Midpoint (H), que permite estimar diversos indicadores ambientais, incluindo mudança climática, acidificação, eutrofização, redução da camada de ozônio, escassez de recursos fósseis, toxicidade humana e ecotoxicidade, uso da terra, consumo de água e radiação ionizante.

### 3.10.3 Unidade funcional

A unidade funcional (UF) adotada foi 1 m<sup>2</sup> de pista de pouso e decolagem, permitindo a comparação direta entre diferentes estratégias de M&R. Os resultados obtidos por metro quadrado foram posteriormente extrapolados para a área de cada seção da pista, possibilitando a estimativa dos impactos ambientais totais ao longo dos horizontes de análise de 20, 30 e 40 anos.

### 3.10.4 Inventário do ciclo de vida (ICV)

O inventário do ciclo de vida foi elaborado considerando os principais fluxos de entrada e saída associados às atividades de M&R do pavimento aeroportuário. As entradas incluem materiais, energia e transporte necessários para execução das intervenções, tais como agregados, ligantes asfálticos, água, diesel, eletricidade e transporte de materiais.

As saídas correspondem aos produtos resultantes das intervenções, bem como às emissões e resíduos gerados, incluindo emissões atmosféricas (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> e material particulado), efluentes líquidos provenientes da lavagem de equipamentos e resíduos sólidos como borracha removida, RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) e embalagens. A Tabela 25 apresenta o inventário de entradas e saídas considerado para cada serviço de manutenção e reabilitação modelado na ACV.

Tabela 25 - Inventário de entradas e saídas por serviço de M&R na PPD (UF: 1 m<sup>2</sup>).

Serviço	Entradas	Saídas
<b>Remoção de borracha</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Água</li> <li>• Diesel</li> <li>• Eletricidade</li> <li>• Transporte (tkm)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produto: Pista limpa</li> <li>• Emissões para o ar: CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, material particulado (MP)</li> <li>• Emissões para a água: efluente contaminado (água + partículas)</li> <li>• Resíduos: borracha removida, lodo/borra, sucata de discos</li> </ul>
<b>Manutenção preventiva</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agregados miúdos</li> <li>• Ligante (emulsão asfáltica) e polímero (SBS)</li> <li>• Filler (cimento) <ul style="list-style-type: none"> <li>• Água</li> <li>• Diesel</li> </ul> </li> <li>• Eletricidade</li> <li>• Transporte (tkm)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produto: Pista microrrevestida</li> <li>• Emissões para o ar: CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, MP</li> <li>• Emissões para a água: efluente de lavagem de equipamentos</li> <li>• Resíduos: embalagens, sobra de calda endurecida</li> </ul>
<b>Manutenção corretiva</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diesel</li> <li>• CA (Concreto Asfáltico) OU componentes (agregados, CAP, filler, polímero) + energia de usina <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ligante</li> </ul> </li> <li>• Transporte (tkm)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produto: Pista recapada</li> <li>• Emissões para o ar: CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, MP</li> <li>• Emissões para a água: efluente de lavagem <ul style="list-style-type: none"> <li>• Resíduos: RAP (para reciclagem ou aterro), embalagens</li> </ul> </li> </ul>
<b>Reforço</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CA OU componentes desagregados (agregados, CAP, filler, polímero) + energia de usina</li> <li>• Pintura de ligação (asfalto) <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diesel</li> </ul> </li> <li>• Transporte (tkm)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produto: Pista reforçada</li> <li>• Emissões para o ar: CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, MP</li> <li>• Emissões para a água: efluente de lavagem</li> <li>• Resíduos: embalagens; sobra de mistura endurecida</li> </ul>
<b>Reconstrução do revestimento*</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Materiais: agregados, betume, polímero, filer</li> <li>• Óleo combustível <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diesel</li> </ul> </li> <li>• Transporte (tkm)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pista reabilitada</li> <li>• Emissões para o ar: CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, MP</li> <li>• Emissões para a água: efluente de lavagem</li> <li>• Resíduos: RAP, embalagens</li> </ul>
<b>Reconstrução</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Materiais granulares: reforço de subleito, sub-base, base <ul style="list-style-type: none"> <li>• Imprimação (ligante diluído/emulsão)</li> </ul> </li> <li>• Revestimento asfáltico <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diesel</li> </ul> </li> <li>• Transporte (tkm)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produto: Estrutura reconstruída</li> <li>• Emissões para o ar: CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, MP</li> <li>• Emissões para a água: efluente de lavagem</li> <li>• Resíduos: CA fresado/material da antiga PPD, embalagens</li> </ul>

\*Usado apenas para análise de cenários.

### 3.10.5 Avaliação de impactos do ciclo de vida

A avaliação dos impactos ambientais foi realizada utilizando o método ReCiPe 2016 Midpoint (H), sendo considerado neste estudo o indicador de mudança climática, expresso em kg de CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub>e).

### 3.10.6 Monetização dos impactos ambientais

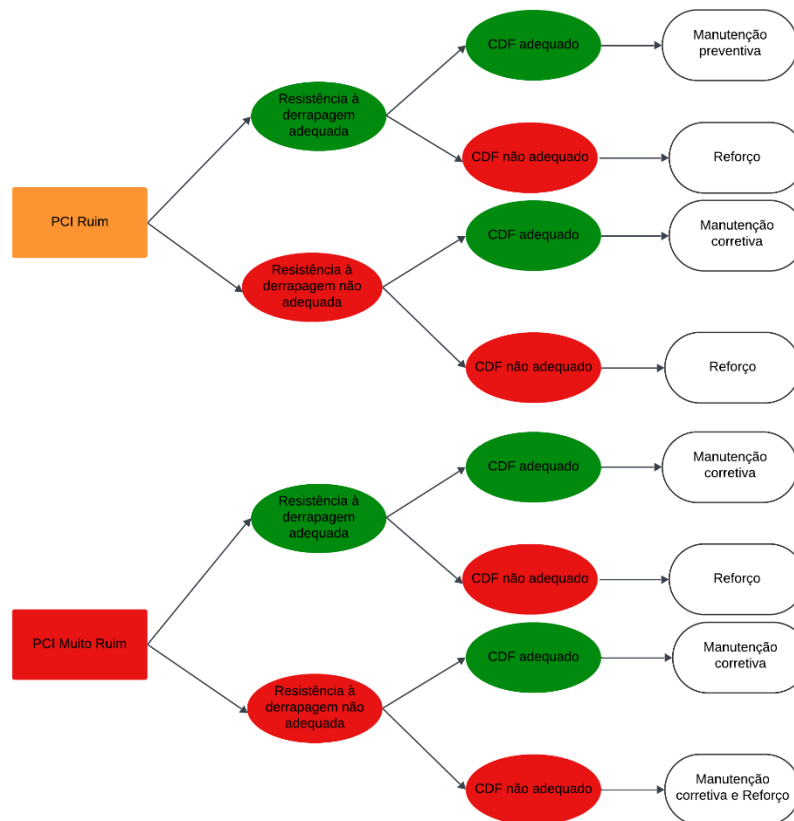
As emissões de CO<sub>2</sub> equivalente estimadas para cada alternativa de M&R foram convertidas em valores monetários utilizando o preço do carbono do *European Union Emissions Trading System*, fixado em US\$ 61,30 por tonelada de CO<sub>2</sub>e em 2024, conforme dados do *World Bank Group* (World Bank Group, 2024). Uma limitação desta pesquisa, previamente estabelecida como premissa do método, refere-se à adoção de um preço fixo do carbono. Reconhece-se que esse valor pode variar ao longo do tempo; entretanto, para a abordagem determinística adotada neste estudo, foi utilizado o preço do carbono referente ao ano de 2024. Recomenda-se que estudos futuros considerem a variação desse valor ao longo do tempo, a fim de avaliar de forma mais abrangente seus efeitos sobre os resultados.

Inicialmente, as emissões estimadas por metro quadrado foram multiplicadas pela área de cada seção da pista. Em seguida, os valores foram monetizados com base no preço do carbono e descontados ao longo do horizonte de análise, resultando no cálculo do Valor Presente Líquido Ambiental (VPL Ambiental) para os períodos de 20, 30 e 40 anos.

### 3.11 Análise de cenários de manutenção e reabilitação (M&R)

Na análise de cenários, foi realizada uma alteração na árvore de decisão inicialmente proposta (Figura 9), substituindo a manutenção corretiva pela manutenção preventiva nas seções classificadas com PCI ruim e CDF adequado. Essa mudança se justifica porque, nessas condições, a capacidade estrutural do pavimento ainda se mantém adequada, o que favorece manutenções preventivas em vez de corretivas, especialmente em pistas aeroportuárias únicas, onde a disponibilidade operacional para obras é limitada. Além disso, considerando que o PCI crítico de serviço é 40 e que o intervalo correspondente à classificação Ruim se situa entre 55 e 40, a manutenção preventiva mostra-se compatível com essa faixa, permitindo retardar a deterioração e postergar ações mais onerosas sem comprometer o desempenho estrutural (ASTM, 2020). Foi adicionada também uma etapa intermediária de reforço e manutenção corretiva quando o PCI é Muito Ruim e o CDF não está adequado, pois o reforço estrutural é uma alternativa tecnicamente eficaz e economicamente menos onerosa do que a reconstrução completa. Essa mudança na árvore de decisão pode ser observada na Figura 10.

Figura 10 - Modificação na árvore de decisão.



Outros cenários considerados foram reconstruções no revestimento, como reconstrução total em um ano específico, reconstrução parcial (nas seções em que o PCI é Ruim ou Muito Ruim ou nas seções de maiores áreas) e reconstrução a cada 10 anos. A análise de cenários também foi realizada para os horizontes de 20 anos, 30 anos e 40 anos e o custo total do ciclo de vida foi dado pela somatória do VPL Monetário e VPL Ambiental.

### 3.12 Análise de Oportunidade e Análise de Sensibilidade

Foi realizada uma análise de Oportunidade para determinar o melhor cenário entre os analisados. Para isso, foi definido um Índice de Oportunidade (ICO) conforme Equação 9.

$$ICO = \frac{VPL \text{ Cenário}}{VPL \text{ Original}} \quad (9)$$

Onde:

ICO = Índice de Oportunidade

VPL Cenário = VPL do cenário alternativo analisado

VPL Original = VPL calculado para as estratégias de M&R definidas na árvore de decisão original (Figura 9).

Se:

$ICO < 1$ , o cenário melhora o desempenho.

$ICO = 1$ , o cenário tem custo equivalente ao original.

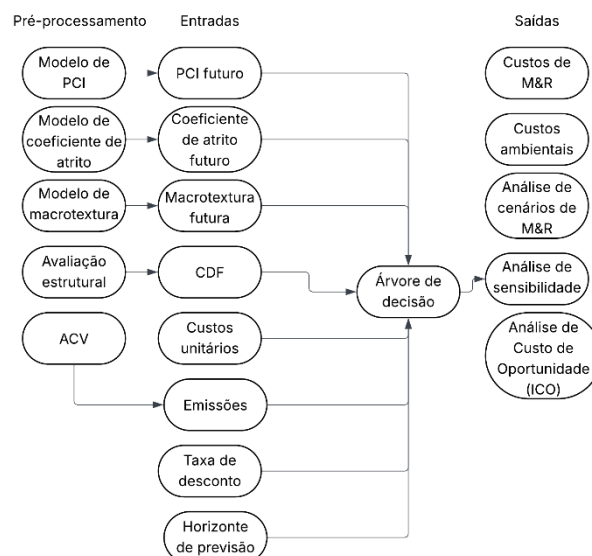
$ICO > 1$ , o cenário é pior do que o original.

Foi realizada também uma análise de sensibilidade em relação à taxa de desconto utilizada para calcular o VPL. Foi considerado o cenário de melhor ICO para realizar a análise de sensibilidade. Foram testadas três taxas de desconto (7,5% a.a, 8,5% a.a. e 9,5% a.a.) para verificar como pequenas variações na taxa de desconto (variações de 1%) afetam os custos de M&R.

### 3.13 Método Proposto

O método integrado de ACCV e ACV desenvolvido neste estudo foi disponibilizado para o usuário por meio de um *software* denominado LCCA-SGPA, que contemplam os modelos de previsão de desempenho, a determinação dos custos de M&R e ambientais, a análise de cenários e a análise de sensibilidade, com o cálculo do ICO. Além do *software*, foi desenvolvido também um manual do usuário. Todos os arquivos, incluindo o instalador e o manual do usuário, podem ser baixados no *QRCode* disponível no Apêndice 3. A Figura 11 apresenta um fluxograma de funcionamento do método proposto.

Figura 11 - Fluxograma de funcionamento do método integrado de ACCV e ACV.



## 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados apresentados neste capítulo demonstram a aplicação do método integrado proposto nesta tese a uma pista de pouso e decolagem (PPD) brasileira. A integração entre desempenho funcional, estrutural, segurança operacional, custos econômicos e impactos ambientais ao longo do ciclo de vida permite avaliar cenários de manutenção e reabilitação (M&R) e apoiar a tomada de decisão. Na sequência, são apresentados e discutidos os resultados obtidos para os diferentes módulos do método, abrangendo a avaliação funcional, estrutural e de resistência à derrapagem dos pavimentos, a modelagem preditiva, as análises econômica e ambiental do ciclo de vida, bem como a comparação de cenários e a análise de sensibilidade.

### 4.1 Análise descritiva

Uma análise descritiva do *Pavement Condition Index* (PCI) da PPD estudada, para os anos de 2018, 2021, 2022 e 2023, é apresentada na Tabela 26. São apresentados os valores das medidas de tendência central, dispersão e a classificação do PCI.

Tabela 26 - Análise Descritiva do PCI no período estudado.

Análise Descritiva	PCI			
	2018	2021	2022	2023
<b>Média</b>	57,13	92,78	83,90	86,90
<b>Mediana</b>	57,55	94,00	84,00	87,00
<b>Desvio padrão</b>	3,82	1,72	3,70	3,93
<b>CV (%)</b>	6,68	1,85	4,40	4,52
<b>Mínimo</b>	51,93	89,00	78,00	81,00
<b>Máximo</b>	62,55	94,00	90,00	93,00
<b>Classificação do PCI</b>	Regular	Bom	Bom	Bom

Percebe-se, na Tabela 26, que os valores médios de PCI aumentaram entre os anos de 2018 e 2021 em 63,3%, sendo classificados de Regular para Bom. Isso pode ser devido à reabilitação do revestimento da PPD em 2020. Isso resultou em melhoria na condição funcional do pavimento, refletido pelo aumento do PCI. Entre os anos 2021 e 2022 houve um decréscimo 9,6% no valor do PCI, como consequência da ação do clima e do tráfego (pousos e decolagens). Todos os anos são realizadas ações de conservação no pavimento, podendo ser observado aumento do PCI no ano de 2023. A Tabela 27 apresenta uma análise descritiva do coeficiente de atrito da PPD entre os anos de 2014 e 2023. Os dados são apresentados para os lados direito (D) e esquerdo (E) e a 3 m e 6 m do eixo da PPD.

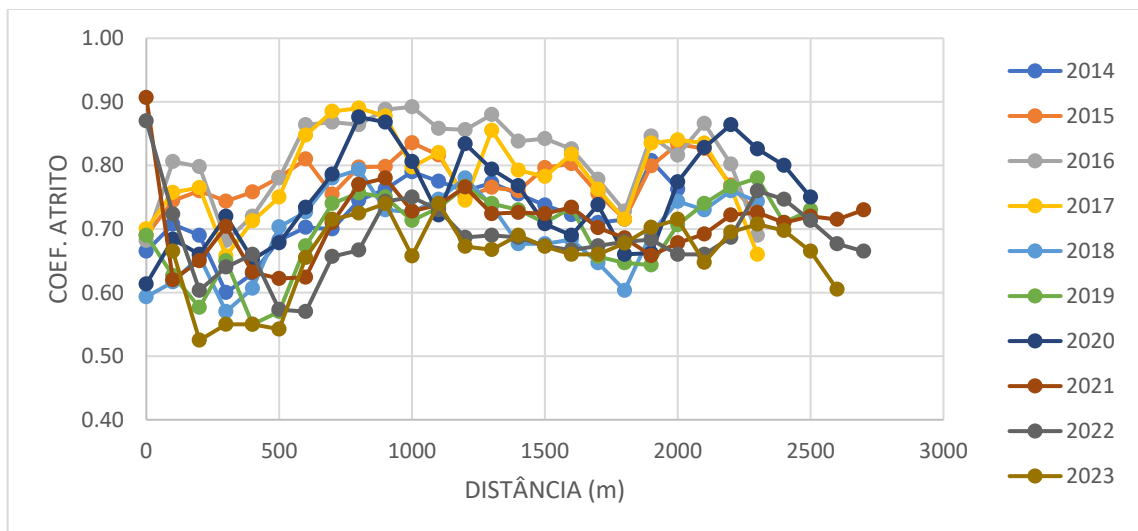
Tabela 27 - Análise descritiva do coeficiente de atrito.

<i>Estatística Descritiva</i>	<b>2023</b>				<b>2022</b>			
	<i>3m D</i>	<i>3m E</i>	<i>6m D</i>	<i>6m E</i>	<i>3m D</i>	<i>3m E</i>	<i>6m D</i>	<i>6m E</i>
<i>Média</i>	0,6615	0,6961	0,6738	0,6851	0,6855	0,6989	0,6923	0,6799
<i>Mediana</i>	0,6700	0,7113	0,6750	0,6763	0,6783	0,7100	0,6933	0,6733
<i>Desvio padrão</i>	0,0603	0,0727	0,0207	0,0505	0,0590	0,0629	0,0467	0,0470
<i>Variância da amostra</i>	0,0036	0,0053	0,0004	0,0026	0,0035	0,0040	0,0022	0,0022
<i>Intervalo</i>	0,2150	0,2950	0,0750	0,1900	0,3000	0,3050	0,2000	0,2033
<i>Mínimo</i>	0,5250	0,5000	0,6300	0,5900	0,5700	0,4700	0,5800	0,5933
<i>Máximo</i>	0,7400	0,7950	0,7050	0,7800	0,8700	0,7750	0,7800	0,7967
	<b>2021</b>				<b>2020</b>			
<i>Média</i>	0,7106	0,7299	0,7532	0,7573	0,7498	0,7285	0,7398	0,7526
<i>Mediana</i>	0,7175	0,7310	0,7510	0,7520	0,7440	0,7250	0,7400	0,7530
<i>Desvio padrão</i>	0,0581	0,0534	0,0407	0,0638	0,0750	0,0881	0,0443	0,0448
<i>Variância da amostra</i>	0,0034	0,0028	0,0017	0,0041	0,0056	0,0078	0,0020	0,0020
<i>Intervalo</i>	0,2867	0,2793	0,1720	0,3440	0,2627	0,4027	0,1733	0,1400
<i>Mínimo</i>	0,6200	0,6240	0,6880	0,6760	0,6133	0,4533	0,6467	0,6780
<i>Máximo</i>	0,9067	0,9033	0,8600	1,0200	0,8760	0,8560	0,8200	0,8180
	<b>2019</b>				<b>2018</b>			
<i>Média</i>	0,6958	0,7133	0,7220	0,7367	0,6968	0,6976	0,6711	0,7111
<i>Mediana</i>	0,7117	0,7133	0,7067	0,7417	0,7150	0,7033	0,6600	0,7133
<i>Desvio padrão</i>	0,0636	0,0678	0,0562	0,0355	0,0642	0,0536	0,0400	0,0340
<i>Variância da amostra</i>	0,0040	0,0046	0,0032	0,0013	0,0041	0,0029	0,0016	0,0012
<i>Intervalo</i>	0,2300	0,2400	0,2200	0,1367	0,2233	0,1867	0,1467	0,1467
<i>Mínimo</i>	0,5500	0,5800	0,6300	0,6633	0,5700	0,5800	0,6167	0,6300
<i>Máximo</i>	0,7800	0,8200	0,8500	0,8000	0,7933	0,7667	0,7633	0,7767
	<b>2017</b>				<b>2016</b>			
<i>Média</i>	0,7860	0,8040	0,7928	0,7897	0,8113	0,8153	0,8129	0,8307
<i>Mediana</i>	0,7875	0,8138	0,7975	0,8038	0,8320	0,8220	0,8000	0,8320
<i>Desvio padrão</i>	0,0669	0,0573	0,0667	0,0573	0,0666	0,0617	0,0523	0,0622
<i>Variância da amostra</i>	0,0045	0,0033	0,0045	0,0033	0,0044	0,0038	0,0027	0,0039
<i>Intervalo</i>	0,2325	0,2250	0,3350	0,2475	0,2100	0,2260	0,1940	0,3200
<i>Mínimo</i>	0,6575	0,6575	0,5500	0,6500	0,6820	0,6820	0,7200	0,6100
<i>Máximo</i>	0,8900	0,8825	0,8850	0,8975	0,8920	0,9080	0,9140	0,9300
	<b>2015</b>				<b>2014</b>			
<i>Média</i>	0,7744	0,7803	0,7784	0,7698	0,7235	0,7302	0,7824	0,7542
<i>Mediana</i>	0,7673	0,7891	0,7841	0,7750	0,7225	0,7350	0,7775	0,7575
<i>Desvio padrão</i>	0,0380	0,0492	0,0326	0,0475	0,0521	0,0435	0,0345	0,0295
<i>Variância da amostra</i>	0,0014	0,0024	0,0011	0,0023	0,0027	0,0019	0,0012	0,0009
<i>Intervalo</i>	0,1455	0,2364	0,1288	0,2215	0,2075	0,1525	0,1325	0,1075
<i>Mínimo</i>	0,6900	0,6373	0,7067	0,6367	0,6000	0,6325	0,7250	0,6900
<i>Máximo</i>	0,8355	0,8736	0,8355	0,8582	0,8075	0,7850	0,8575	0,7975

É possível perceber na Tabela 27 que, nas medições realizadas a 3m do eixo da PPD, o ano que apresentou o maior valor de coeficiente de atrito foi 2016 (média = 0,8153 para o D e mediana = 0,8320 para o E), e o ano que apresentou o menor valor foi 2023 (média = 0,6615 para o D e mediana = 0,6700 para o D), tanto para a média, quanto para a mediana. Nota-se, também, um aumento nesses valores de 2014 a 2016, de cerca de 6,5%, e uma diminuição de cerca de 13,8% a partir de 2017 até 2019, tendo um novo aumento de 3,4% em 2020, ano em que ocorreu a reabilitação do revestimento asfáltico da PPD. Entre 2021 e 2023, percebe-se uma diminuição de cerca de 4,6% nos valores de coeficiente de atrito. Isso pode ter ocorrido por diversos fatores, como desgaste do revestimento asfáltico, polimento dos agregados e acúmulo de borracha dos pneus das aeronaves, evidenciando a importância de monitorar esse parâmetro ao longo do tempo para definir as estratégias de M&R mais viáveis.

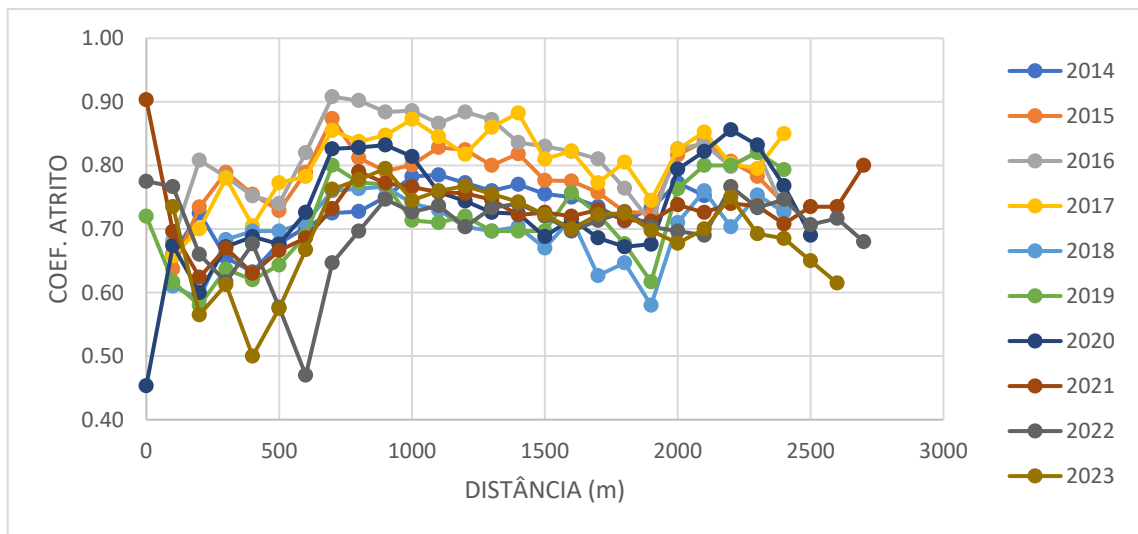
Para as medições realizadas a 6m do eixo da PPD, observa-se, na Tabela 27, que o ano de 2016 foi o que obteve maior valor de coeficiente de atrito (média = 0,8307 para o E e mediana = 0,8320 para o E), com o menor valor sendo obtido também em 2023 (média = 0,6738 para o D e mediana = 0,6750 para o D). Nota-se, assim como ocorreu para 3 m do eixo da PPD, o mesmo aumento nos valores de coeficiente de atrito entre 2014 e 2016, de cerca de 9%, com uma diminuição de 9,6% entre 2017 e 2019, um crescimento de 0,7% de 2020 a 2021, e uma diminuição de 1,1% de 2022 a 2023, mostrando um comportamento cíclico, observado também por Quariguasi *et. al* (2018). Isso pode ter ocorrido devido aos processos de M&R e remoção do acúmulo de borracha na PPD. As Figuras 12 e 13 apresentam a variação do coeficiente de atrito médio ao longo da PPD estudada, para os lados direito e esquerdo, respectivamente.

Figura 12 - Coeficiente de atrito a 3m D do eixo da PPD - 2014 a 2023.



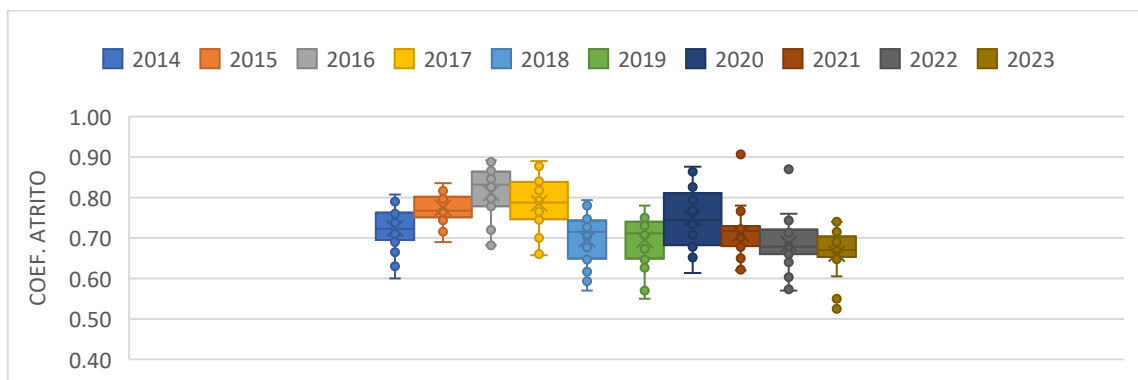
No que diz respeito à análise por terços de pista, observa-se, na Figura 12, que os valores de coeficiente de atrito médio ao ano tendem a diminuir no 1º terço da pista. O 2º terço é o que apresenta os maiores valores de coeficiente de atrito, seguido pelo 3º terço. Isso pode ocorrer devido ao fato do 1º terço ser o mais solicitado nas operações de pouso e decolagem, causando os maiores desgastes e acúmulos de borracha no pavimento, na zona de toque. Além disso, os valores de coeficiente de atrito mantiveram-se acima do valor mínimo (0,43) especificado em ANAC (2023b) em toda a extensão da PPD.

Figura 13 - Coeficiente de atrito a 3m E do eixo da PPD - 2014 a 2023.



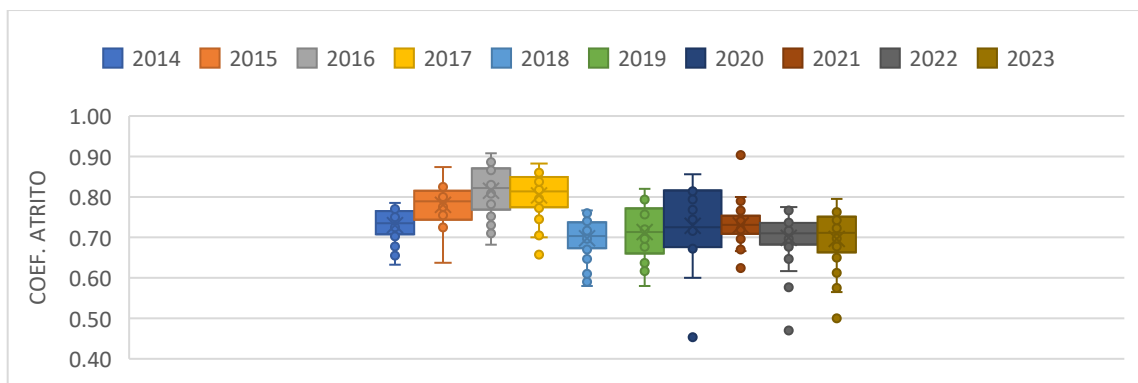
Na Figura 13 observa-se um comportamento semelhante, com o 2º terço da PPD apresentando os maiores valores de coeficiente de atrito médio ao ano, enquanto o 1º terço apresenta os menores valores. O coeficiente de atrito medido a 3m do lado esquerdo (E) também apresentou valores acima do mínimo especificado em ANAC (2023b) em toda a PPD. As Figuras 14 e 15 apresentam um *boxplot* para os dados de coeficiente de atrito médio a 3m do eixo da PPD, para os lados direito (D) e esquerdo (E), respectivamente.

Figura 14 - *Boxplot* do coeficiente de atrito a 3m D do eixo da PPD - 2014 a 2023.



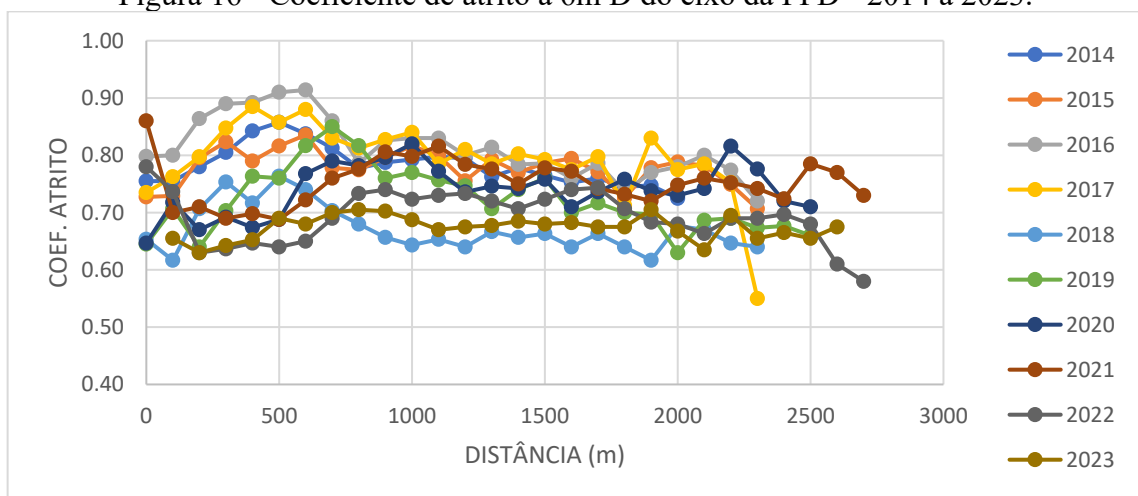
Da Figura 14 é possível perceber que, para as medições realizadas a 3m no lado direito (D) da PPD, ocorre a mesma tendência de crescimento e decréscimo dos valores de coeficiente de atrito observados na análise descritiva. Além disso, nota-se, também, a presença de alguns *outliers*. Em relação à variação dos dados, o ano que apresentou maior variação nos valores foi 2020. Isso pode ter acontecido devido ao processo de reabilitação do revestimento realizado em 2020. Os dados utilizados correspondem a medições realizadas antes e após a obra, resultando em valores de coeficiente de atrito mais baixos no período pré-reabilitação e mais elevados no pós-reabilitação (Maia *et al.*, 2023), ampliando a variabilidade dos resultados.

Figura 15 - *Boxplot* do coeficiente de atrito a 3m E do eixo da PPD - 2014 a 2023.



Observa-se que nas medições realizadas a 3m do lado esquerdo (E) da PPD, ocorreu um comportamento semelhante ao observado na análise descritiva (Figura 15). A maior variação nos dados também ocorreu no ano de 2020. Nota-se, ainda, a presença de alguns *outliers*. As Figuras 16 e 17 mostram a variação do coeficiente de atrito médio ao ano para as medições realizadas a 6 m do eixo da PPD, para os lados direito (D) e esquerdo (E), respectivamente.

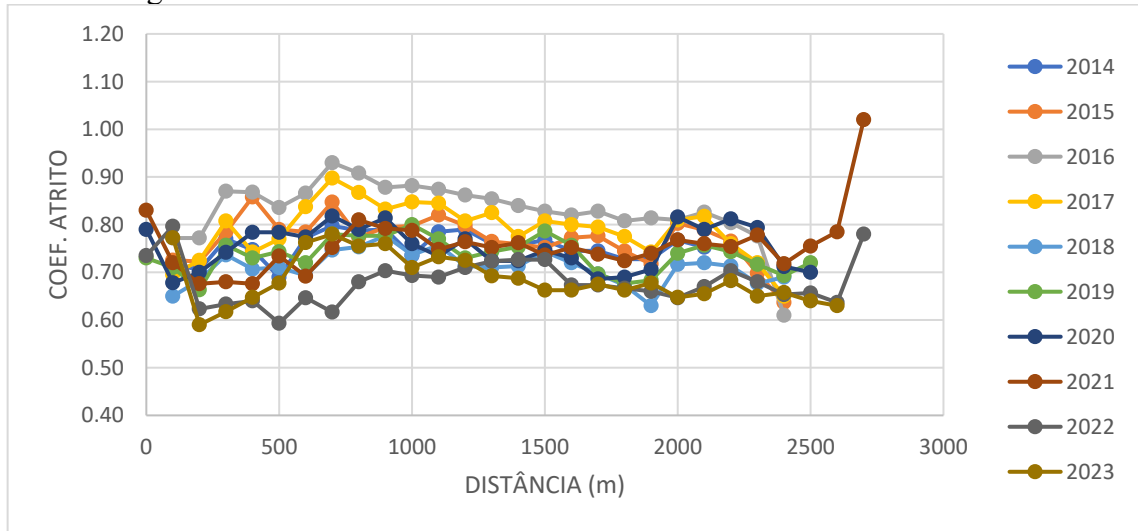
Figura 16 - Coeficiente de atrito a 6m D do eixo da PPD - 2014 a 2023.



Nas medições realizadas a 6m do eixo da PPD, no lado direito (D) (Figura 16), nota-se uma tendência contrária ao que aconteceu com as medições a 3m, pois o 1º terço apresenta os

maiores valores de coeficiente de atrito. Isso pode ter ocorrido devido a maior quantidade de aeronaves de médio e pequeno porte nessa PPD e menor quantidade de aeronaves de porte grande, de acordo como *mix* de aeronaves. Ainda, os valores de coeficiente de atrito mantiveram-se acima do nível mínimo de manutenção (0,53) em toda a PPD (ANAC, 2023b).

Figura 17 - Coeficiente de atrito a 6m E do eixo da PPD - 2014 a 2023.



Nas medições realizadas a 6m do eixo da PPD, no lado esquerdo (E), o comportamento foi semelhante ao lado direito (Figura 17). No entanto, observa-se também valores elevados de coeficiente de atrito ao final da PPD nos anos de 2021 e 2022. Esses valores podem ser considerados *outliers*. O coeficiente de atrito também se manteve acima do limite de manutenção definido em ANAC (2023b) em toda a PPD. As Figuras 18 e 19 apresentam um *boxplot* para o coeficiente de atrito médio medido a 6m do eixo da PPD para os lados direito (D) e esquerdo (E), respectivamente.

Figura 18 - *Boxplot* do coeficiente de atrito a 6m D do eixo da PPD - 2014 a 2023.

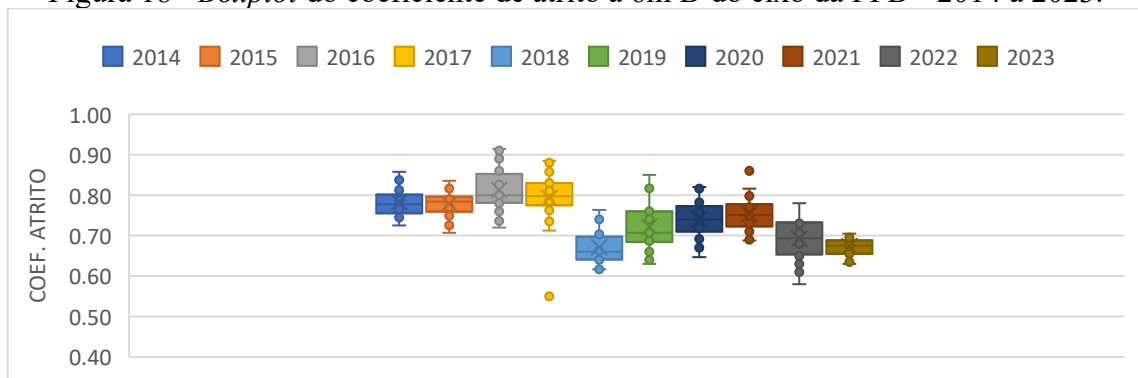
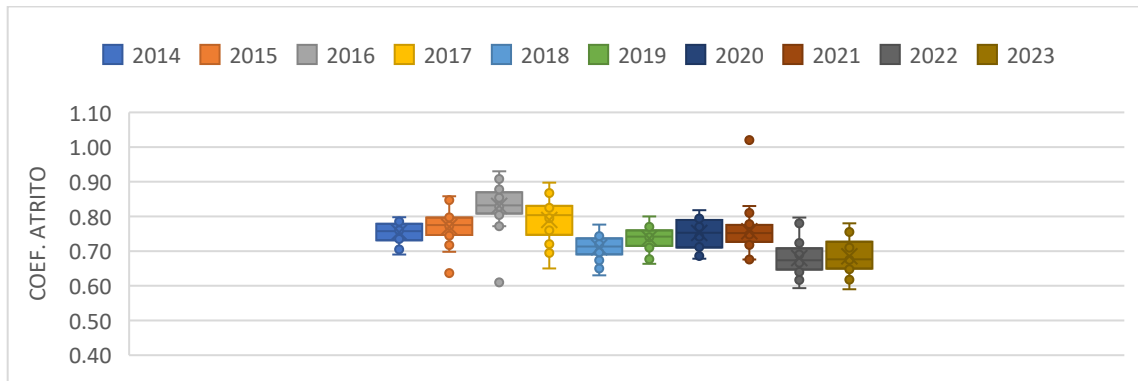


Figura 19 - *Boxplot* do coeficiente de atrito a 6m E do eixo da PPD - 2014 a 2023.

Observando-se as Figuras 18 e 19, nota-se o mesmo comportamento visto na análise descritiva. Além disso, é possível perceber a presença de alguns *outliers*. No lado direito, o ano que apresentou maior variação nos dados foi 2022, enquanto no lado esquerdo foi 2017. Também foi realizada a análise descritiva da macrotextura. Os resultados estão apresentados na Tabela 28.

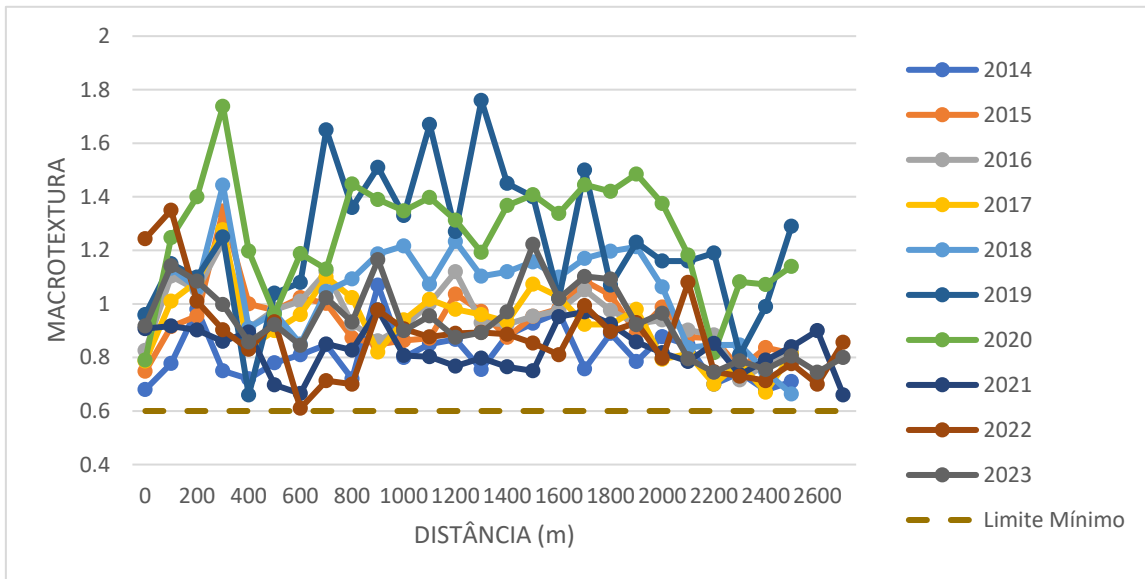
Tabela 28 - Análise descritiva da macrotextura (em mm) – 2014 a 2023.

<i>Análise Descritiva</i>	<i>2014</i>	<i>2015</i>	<i>2016</i>	<i>2017</i>	<i>2018</i>	<i>2019</i>	<i>2020</i>	<i>2021</i>	<i>2022</i>	<i>2023</i>
<i>Toda a PPD</i>										
<i>Média</i>	0,81	0,94	0,95	0,93	1,05	1,23	1,26	0,80	0,86	0,95
<i>Mediana</i>	0,79	0,93	0,94	0,94	1,08	1,21	1,33	0,80	0,89	0,91
<i>Desvio padrão</i>	0,10	0,12	0,11	0,14	0,18	0,26	0,21	0,09	0,20	0,16
<i>Variância da amostra</i>	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,07	0,04	0,01	0,04	0,03
<i>Intervalo</i>	0,39	0,60	0,52	0,61	0,78	0,11	0,95	0,34	0,83	0,56
<i>Mínimo</i>	0,68	0,75	0,72	0,67	0,66	0,66	0,79	0,69	0,49	0,72
<i>Máximo</i>	1,07	1,35	1,23	1,28	1,44	1,76	1,74	1,03	1,32	1,27
<i>1º terço</i>										
<i>Média</i>	0,81	0,97	1,00	0,98	1,06	1,18	1,25	0,81	0,89	1,04
<i>Mediana</i>	0,78	0,97	0,99	0,99	1,05	1,13	1,22	0,84	0,91	1,04
<i>Desvio padrão</i>	0,12	0,16	0,13	0,15	0,17	0,28	0,27	0,10	0,26	0,12
<i>Variância da amostra</i>	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,08	0,07	0,01	0,07	0,02
<i>Intervalo</i>	0,39	0,60	0,41	0,49	0,59	0,20	0,95	0,30	0,83	0,35
<i>Mínimo</i>	0,68	0,75	0,83	0,79	0,85	0,66	0,79	0,69	0,49	0,89
<i>Máximo</i>	1,07	1,35	1,23	1,28	1,44	1,65	1,74	0,99	1,32	1,24
<i>2º terço</i>										
<i>Média</i>	0,86	0,96	0,98	0,98	1,15	1,39	1,36	0,80	0,92	0,95
<i>Mediana</i>	0,87	0,97	0,98	0,96	1,16	1,40	1,37	0,80	0,91	0,91
<i>Desvio padrão</i>	0,07	0,08	0,07	0,05	0,06	0,25	0,08	0,11	0,13	0,19
<i>Variância da amostra</i>	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,06	0,01	0,01	0,02	0,04
<i>Intervalo</i>	0,21	0,22	0,21	0,15	0,16	0,19	0,25	0,34	0,47	0,53
<i>Mínimo</i>	0,76	0,86	0,91	0,92	1,07	1,02	1,19	0,70	0,72	0,75
<i>Máximo</i>	0,97	1,09	1,12	1,07	1,23	1,76	1,45	1,03	1,19	1,27
<i>3º terço</i>										
<i>Média</i>	0,76	0,86	0,85	0,79	0,89	1,12	1,17	0,81	0,76	0,86
<i>Mediana</i>	0,74	0,87	0,88	0,79	0,85	1,16	1,14	0,79	0,71	0,84
<i>Desvio padrão</i>	0,08	0,07	0,08	0,10	0,19	0,16	0,22	0,08	0,15	0,12
<i>Variância da amostra</i>	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04	0,03	0,05	0,01	0,02	0,01
<i>Intervalo</i>	0,20	0,23	0,22	0,31	0,55	0,15	0,67	0,22	0,40	0,40
<i>Mínimo</i>	0,68	0,76	0,72	0,67	0,66	0,81	0,82	0,73	0,56	0,72
<i>Máximo</i>	0,88	0,99	0,94	0,98	1,21	1,29	1,49	0,94	0,96	1,12

Percebe-se, pela Tabela 28, que os valores tanto de média quanto de mediana para a macrotextura aumentaram 2,6% entre os anos de 2014 e 2020. Isso pode ter ocorrido devido ao próprio uso da PPD ao longo do tempo, que, ao ser submetida as ações do clima e do tráfego das aeronaves sofreu um desgaste do revestimento asfáltico, tornando a textura superficial mais aberta e rugosa, o que aumenta os valores de macrotextura. Observa-se que, em 2021, houve uma diminuição nos valores de macrotextura. Isso pode ter ocorrido devido à obra de reabilitação em 2020, com o revestimento novo (CA modificado por polímero) sem ter sofrido

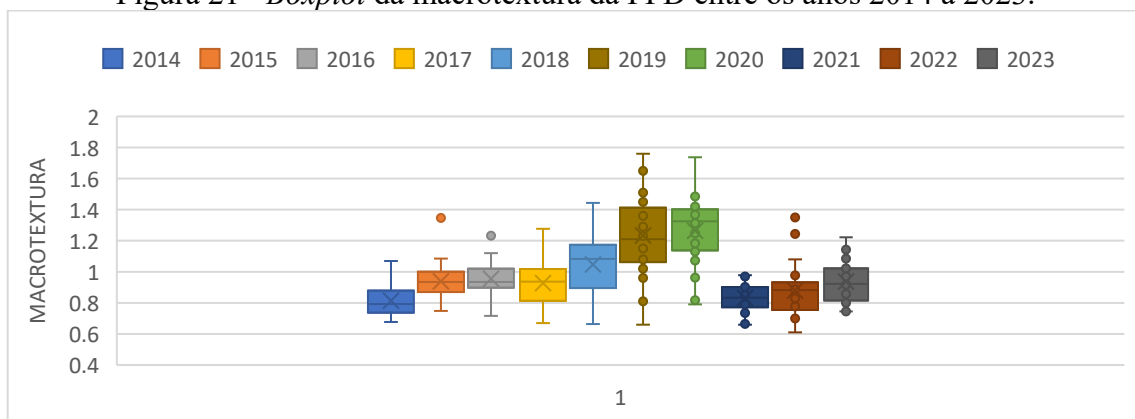
ainda com os desgastes devido às ações do clima e do tráfego das aeronaves, além do processo de consolidação da mistura asfáltica (Maia *et al.*, 2023). Nos anos de 2022 e 2023 os valores de macrotextura voltaram a aumentar. O mesmo comportamento pode ser observado para os três terços da PPD, com o 2º terço apresentando, em geral, os maiores valores de macrotextura. A Figura 20 apresenta a variação dos valores de macrotextura média anual ao longo da PPD.

Figura 20 - Macrotextura da PPD entre os anos 2014 a 2023.



A partir da Figura 20 é possível perceber a mesma tendência em relação aos terços da PPD observada na análise descritiva. Os anos que apresentaram os maiores valores de macrotextura foram 2019 e 2020. A ANAC (2023b) estabelece como limite mínimo para a macrotextura o valor de 0,60 mm. Nota-se, na Figura 20, que para todos os anos analisados a macrotextura manteve-se acima do valor mínimo especificado pela ANAC ao longo de toda a PPD. A Figura 21 apresenta o *boxplot* para os valores médios de macrotextura.

Figura 21 - *Boxplot* da macrotextura da PPD entre os anos 2014 a 2023.



Na Figura 21, nota-se o mesmo comportamento observado anteriormente, com os maiores valores de macrotextura sendo obtidos nos anos de 2019 e 2020. No entanto, nesses anos também foram observadas as maiores dispersões nos resultados. Além disso, é possível perceber a presença de alguns *outliers*. Como foram observados *outliers* tanto nos valores de coeficiente de atrito quanto de macrotextura, uma análise desses parâmetros por meio da sua média pode não ser representativa. Adotar a mediana para analisar os parâmetros de resistência à derrapagem pode ser uma abordagem mais adequada, corroborando com os resultados de Maia, Oliveira e Da Silva (2023).

#### 4.2 Relação entre o PCI e os parâmetros de resistência à derrapagem

Para investigar as relações existentes entre o PCI e o coeficiente de atrito, foram utilizados gráficos de dispersão. Os resultados estão apresentados nas Figuras 22 a 25 para os anos de 2018, 2021, 2022 e 2023, respectivamente, para toda a extensão da PPD de estudo.

Figura 22 - Relação entre o PCI e o coeficiente de atrito para o ano de 2018.

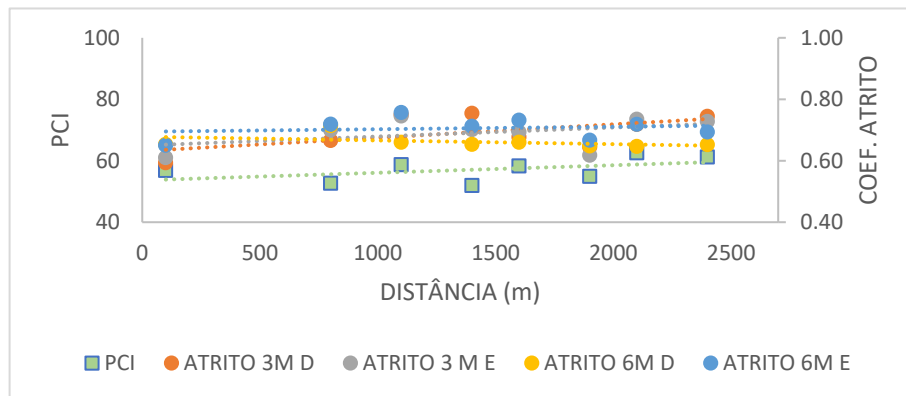


Figura 23 - Relação entre o PCI e o coeficiente de atrito para o ano de 2021.

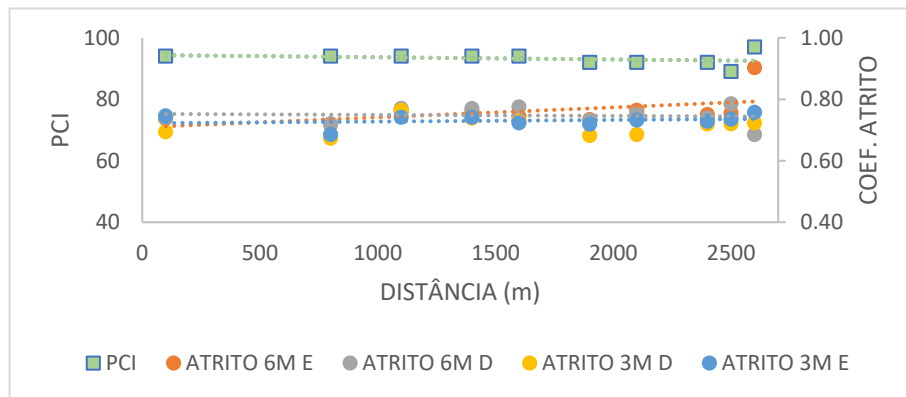


Figura 24 - Relação entre o PCI e o coeficiente de atrito para o ano de 2022.

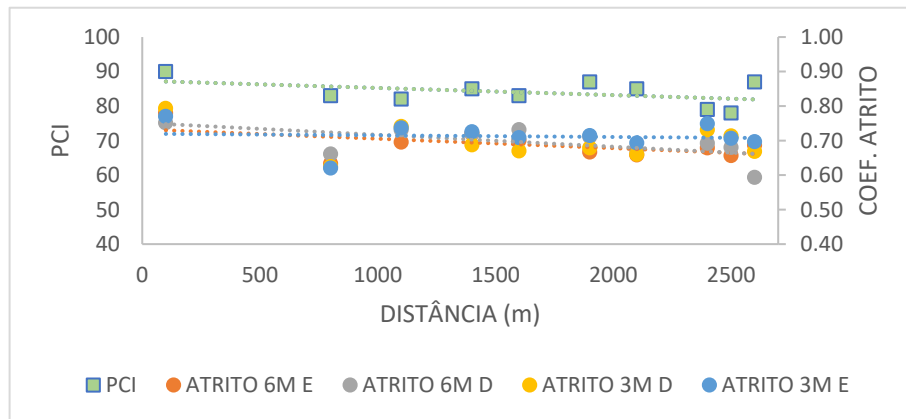
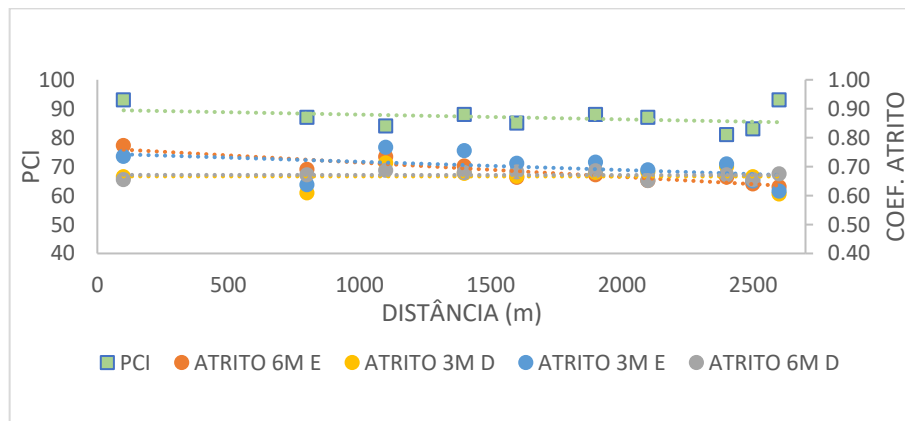


Figura 25 - Relação entre o PCI e o coeficiente de atrito para o ano de 2023.



Observando-se a Figura 22 é possível perceber uma tendência de aumento nos valores de PCI e uma diminuição nos valores de coeficiente de atrito, para as medições realizadas a 6m do lado direito (D) da PPD. Na Figura 23, observa-se o contrário, com um aumento do coeficiente de atrito e diminuição do PCI para as medições no lado direito (D), a 6m do eixo da PPD. Na Figura 24, observa-se uma relação inversa na medição realizada a 3m do lado direito (D) da PPD e uma relação direta nos outros parâmetros analisados, com uma tendência de diminuição do PCI e do coeficiente de atrito ao longo da PPD. Por fim, na Figura 25, é possível observar uma leve tendência de aumento do coeficiente de atrito nas medições realizadas no lado direito (D), e uma tendência de diminuição dos outros parâmetros.

Com o objetivo de verificar de forma mais detalhada a relação entre o PCI e o coeficiente de atrito, observada inicialmente nos gráficos de dispersão, foi realizada uma análise de correlação de *Spearman*. Os resultados estão apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 - Correlação de *Spearman* entre o PCI e o coeficiente de atrito.

Ano	PCIx $\mu$ D3m	PCIx $\mu$ E3m	PCIx $\mu$ D6m	PCIx $\mu$ E6m
2018	0,14	0,52	-0,41	0,19
2021	0,36	0,43	-0,35	0,16
2022	-0,12	0,07	0,12	0,42
2023	-0,46	0,01	-0,03	0,17

$\mu$  - coeficiente de atrito

Observando-se a Tabela 29, é possível perceber que foram obtidas correlações negativas (relação inversa) entre o PCI e o coeficiente de atrito medido a 6m do lado direito (D) da PPD para os anos de 2018 e 2021, entre o PCI e o coeficiente de atrito medido a 3m do lado direito (D) da PPD para o ano de 2022 e entre o PCI e o coeficiente de atrito medido no lado direito (D) da PPD para o ano de 2023, conforme tinha sido observado também nos gráficos de dispersão. Os outros parâmetros apresentaram correlações positivas e diretas. Isso pode ter ocorrido devido ao polimento dos agregados da mistura asfáltica sob a ação do clima e do tráfego. Um pavimento deteriorado e com PCI baixo (revestimento deteriorado) pode apresentar esse tipo de defeito, diminuindo também os valores de coeficiente de atrito. Assim como um pavimento em condições adequadas, com o PCI elevado, deve apresentar um coeficiente de atrito adequado.

As maiores correlações positivas e negativas obtidas entre o PCI e o coeficiente de atrito (Tabela 29) mostram que realizar apenas a avaliação funcional do pavimento, por meio da identificação e severidade dos defeitos, pode não contemplar em sua totalidade os parâmetros de resistência à derrapagem. Evidencia-se a necessidade de realização dos levantamentos de superfície em pavimentos aeroportuários, sobretudo as condições de resistência à derrapagem, tendo em vista a sua importância para a segurança operacional, como observado também por Oliveira *et al.* (2023).

Para verificar a relação entre o PCI e a profundidade da macrotextura (PM), foram utilizados os gráficos de dispersão das Figuras 26 a 29. Ressalta-se que, na análise da macrotextura, os dados não foram separados por lado de medição.

Figura 26 - Relação entre o PCI e a profundidade da macrotextura (PM) - 2018.

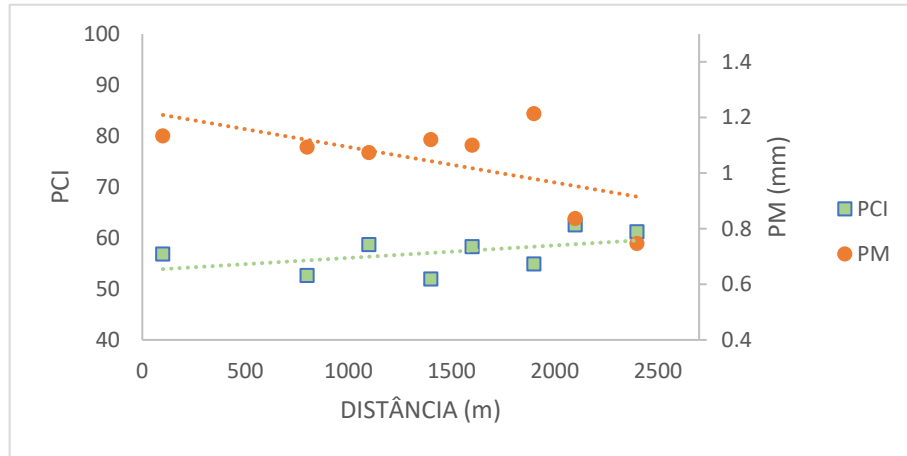


Figura 27 - Relação entre o PCI e a profundidade da macrotextura (PM) - 2021.

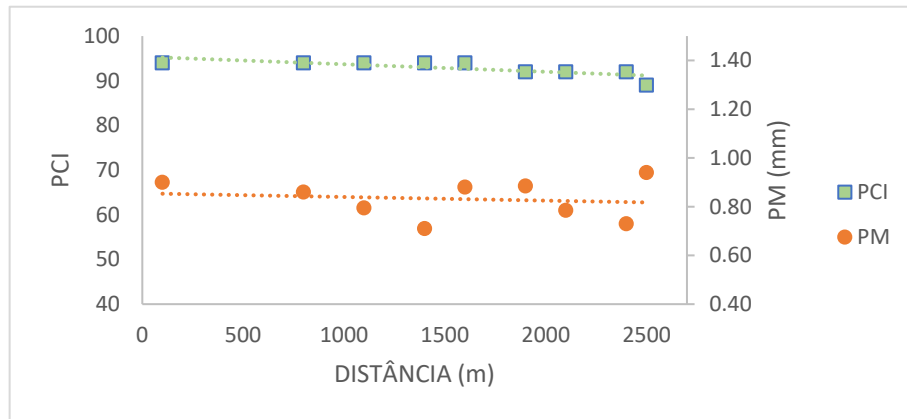


Figura 28 - Relação entre o PCI e a profundidade da macrotextura (PM) - 2022.

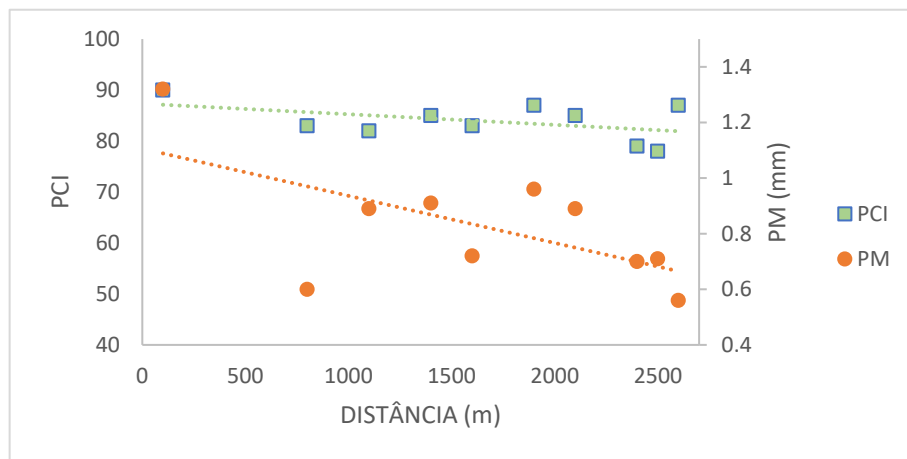
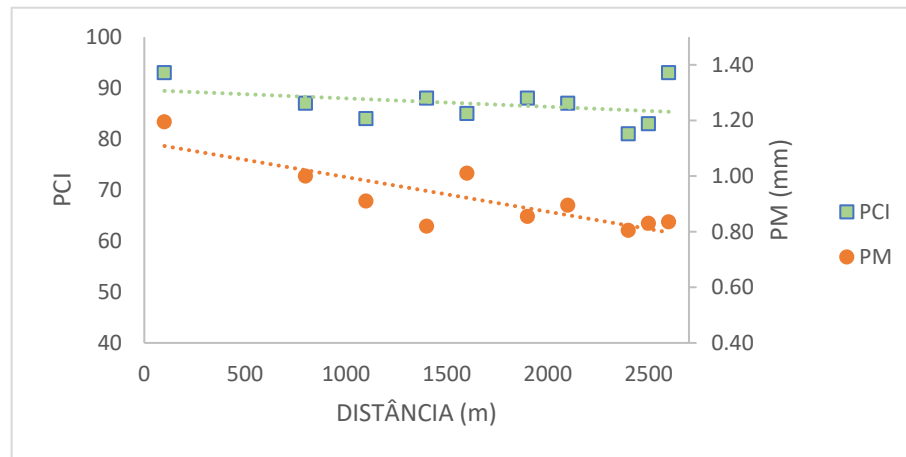


Figura 29 - Relação entre o PCI e a profundidade da macrotextura (PM) - 2023.



Observando-se as Figuras 26 a 29, é possível perceber uma relação inversa entre os valores de PCI e macrotextura para os anos de 2018 e 2021. No ano de 2018, nota-se um aumento nos valores de PCI e diminuição dos valores de macrotextura ao longo da PPD. A macrotextura apresenta valores mais elevados no 1º terço da PPD e tende a diminuir ao longo do seu comprimento, enquanto o PCI apresenta comportamento inverso. Isso pode ter ocorrido porque o primeiro terço da pista, geralmente, é o mais solicitado durante as operações de pouso e decolagem. Isso faz com que o pavimento apresente um maior desgaste nessa seção, aumentando os valores de macrotextura, pela maior abertura da textura do pavimento, e diminuindo os valores de PCI. No 2º e 3º terço esse comportamento se inverte.

No ano de 2021 verificou-se o comportamento oposto, com tendência de diminuição do PCI e aumento da macrotextura ao longo da PPD. Esse fenômeno pode estar associado à reabilitação do revestimento asfáltico realizada em 2020, que melhorou a condição funcional do pavimento, sobretudo no 1º terço da pista, região mais solicitada pelas operações aeroportuárias. Como resultado, os valores de PCI apresentaram-se mais elevados no início da PPD, reduzindo ao longo do seu comprimento, enquanto a macrotextura exibiu tendência contrária, com valores mais baixos no início e progressivo aumento em direção ao final da pista. Resultados semelhantes de redução da macrotextura após intervenções de reabilitação foram reportados por Maia *et al.* (2023), corroborando as observações deste estudo.

Os anos de 2022 e 2023 apresentaram um comportamento semelhante, com uma tendência de diminuição do PCI e da macrotextura ao longo da PPD, caracterizando a relação direta entre os parâmetros nesses anos. Por fim, com o objetivo de analisar de forma mais detalhada a relação entre o PCI e a PM, foi realizada uma análise de correlação de *Spearman*, mostrada na Tabela 30.

Tabela 30 - Correlação de *Spearman* entre o PCI e macrotextura (PM).

Ano	PCIxPM
2018	-0,71
2021	-0,22
2022	0,46
2023	0,29

Observando-se a Tabela 30, é possível perceber uma correlação negativa entre o PCI e a macrotextura nos anos de 2018 e 2021, caracterizando a relação inversa observada também nas Figuras 26 e 27. Nos anos de 2022 e 2023, a correlação foi positiva, mostrando uma relação direta entre os parâmetros analisados. Em 2018, também foram observados os maiores valores de macrotextura e menores valores de PCI. Resultado semelhante foi observado por Oliveira *et al.* (2023), que utilizou dados de 2018 para a mesma PPD deste estudo.

No que diz respeito à segurança operacional, ANAC (2023a) especifica que a macrotextura deve estar acima de 0,60 mm. No entanto, uma macrotextura elevada pode caracterizar um revestimento desgastado, afetando o conforto ao rolamento, a regularidade das operações de pousos e decolagens e o controle direcional das aeronaves. Sendo assim, é importante a realização das avaliações funcionais e de resistência à derrapagem dos pavimentos aeroportuários, corroborando com os resultados de Oliveira *et al.* (2023).

### 4.3 Resultados do PCI

A partir do modelo de previsão do *Pavement Condition Index* (PCI) foi possível determinar o PCI futuro para os períodos de 20 anos, 30 anos e 40 anos, tendo como referência o ano de 2023. As Figuras 30 a 32 mostram as curvas de deterioração do PCI ao longo do tempo, caso nenhuma reabilitação seja realizada. Com os dados de PCI futuro, foi possível determinar a condição funcional do pavimento de cada seção da PPD. A Tabela 31 apresenta o resumo da evolução da condição funcional, com o número de seções, em porcentagem, que correspondem a cada classificação de PCI.

Figura 30 - Curvas de deterioração do PCI - 20 anos.

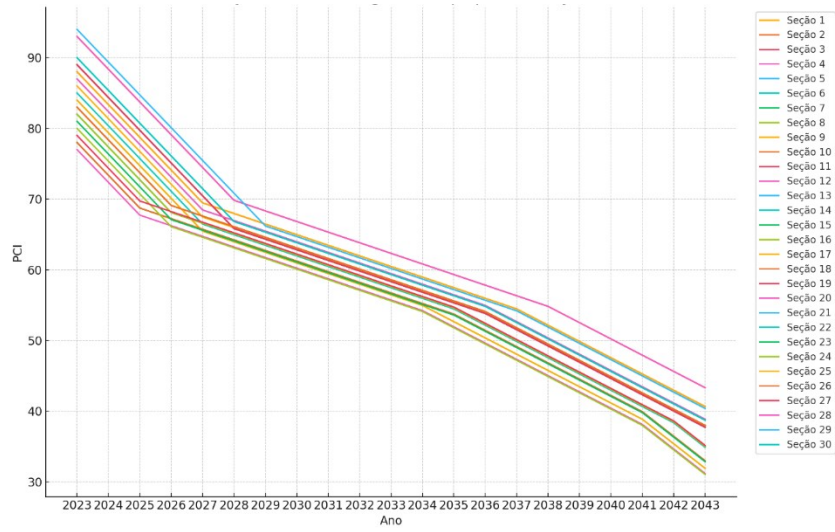


Figura 31 - Curvas de deterioração do PCI - 30 anos.

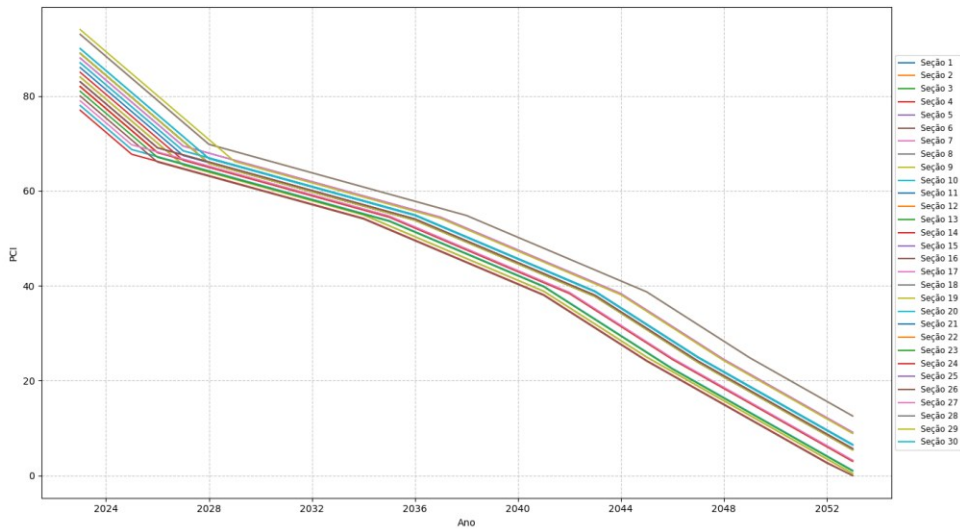
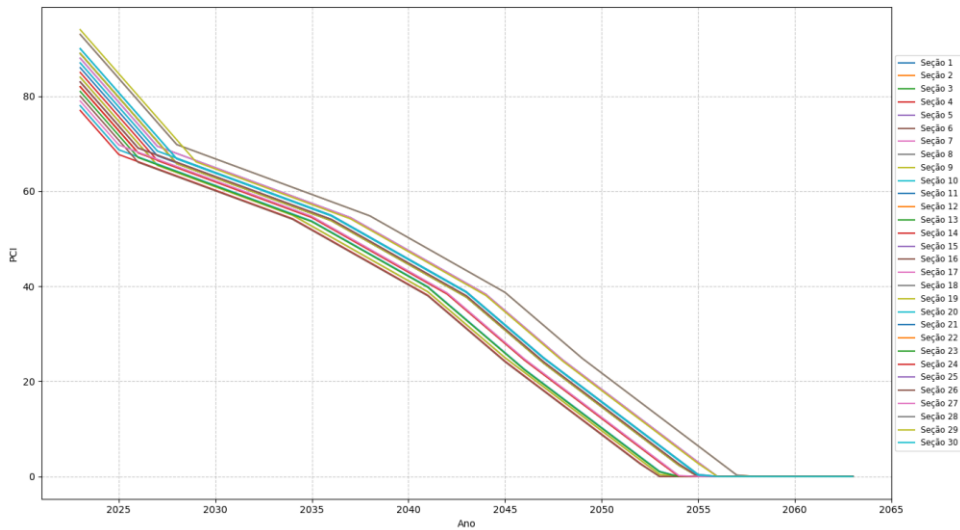


Figura 32 - Curvas de deterioração do PCI - 40 anos.



Observando as Figuras 30 a 32 é possível perceber uma diminuição dos valores de PCI ao longo do tempo, indicando uma piora na condição funcional do pavimento, caso nenhuma reabilitação seja realizada. Além disso, nota-se que a deterioração é maior para maiores valores de PCI iniciais ( $PCI > 65$ ) e também para valores baixos de PCI ( $PCI < 40$ ) ao final da vida útil do pavimento, e menor para valores intermediários de PCI (PCI entre 65 e 45), região na qual a curva é menos inclinada. Esses resultados indicam que a realização de manutenções preventivas na PPD, quando os valores de PCI ainda estão aceitáveis ( $PCI > 55$ ), poderia evitar uma deterioração precoce do pavimento e prolongar a sua vida útil (ANAC, 2017).

Nota-se, ainda, que no horizonte de 30 anos (Figura 31), em algumas seções o PCI é igual a zero, enquanto para o horizonte de 40 anos (Figura 32), todas as seções da PPD atingem o valor zero, caso nenhuma reabilitação seja realizada. Esse comportamento pode ser explicado pela aceleração da deterioração funcional do pavimento quando o PCI atinge valores baixos ( $PCI < 40$ ).

Em níveis reduzidos de condição, pequenas perdas adicionais de desempenho tendem a representar percentuais maiores de deterioração, o que faz com que o PCI reduza mais rapidamente com o tempo. Assim, no horizonte de 30 anos, algumas seções já atingem PCI igual a zero, enquanto no horizonte de 40 anos todas as seções convergem para esse valor, caso nenhuma intervenção de reabilitação seja realizada. Em termos operacionais, isso reforça a necessidade de intervenções de M&R na PPD para manter a sua operacionalidade e segurança.

Tabela 31 - Classificação do PCI por seção do pavimento.

<b>ANO</b>	<b>Bom</b>	<b>Regular</b>	<b>Ruim</b>	<b>Muito Ruim</b>	<b>Péssimo</b>
2023	100%	-	-	-	-
2024	100%	-	-	-	-
2025	86,7%	13,3%	-	-	-
2026	60%	40%	-	-	-
2027	33,3%	66,7%	-	-	-
2028	3,3%	96,7%	-	-	-
2029	-	100%	-	-	-
2030	-	100%	-	-	-
2031	-	100%	-	-	-
2032	-	100%	-	-	-
2033	-	100%	-	-	-
2034	-	86,7%	13,3%	-	-
2035	-	60%	40%	-	-
2036	-	16,7%	83,3%	-	-
2037	-	6,7%	93,3%	-	-
2038	-	-	100%	-	-
2039	-	-	100%	-	-
2040	-	-	100%	-	-
2041	-	-	76,7%	23,3%	-
2042	-	-	60%	40%	-
2043	-	-	16,7%	83,3%	-
<u>2044</u>	=	=	<u>6,7%</u>	<u>93,3%</u>	=
<u>2045</u>	=	=	=	<u>86,7%</u>	<u>13,3%</u>
<u>2046</u>	=	=	=	<u>60%</u>	<u>40%</u>
<u>2047</u>	=	=	=	<u>16,7%</u>	<u>83,3%</u>
<u>2048</u>	=	=	=	<u>6,7%</u>	<u>93,3%</u>
<u>2049</u>	=	=	=	=	<u>100%</u>
<u>2050</u>	=	=	=	=	<u>100%</u>
<u>2051</u>	=	=	=	=	<u>100%</u>
<u>2052</u>	=	=	=	=	<u>100%</u>
<u>2053</u>	=	=	=	=	<u>100%</u>
2054	-	-	-	-	100%
2055	-	-	-	-	100%
2056	-	-	-	-	100%
2057	-	-	-	-	100%
2058	-	-	-	-	100%
2059	-	-	-	-	100%
2060	-	-	-	-	100%
2061	-	-	-	-	100%
2062	-	-	-	-	100%
2063	-	-	-	-	100%

Da Tabela 31 é possível perceber que nos primeiros 10 anos de análise as seções da PPD apresentaram classificação entre Bom e Regular. A partir de 2034 aparecem seções da PPD com a classificação Ruim ou Muito Ruim. Ao final dos primeiros 20 anos de análise, em 2043, não foram identificadas seções com a classificação Péssima. Em 2045 a PPD começa a apresentar seções com a condição péssima e em de 2049 todas as seções da PPD são

classificadas com péssimas. Isso corrobora com a necessidade de manutenções preventivas na PPD para evitar a deterioração precoce do pavimento e mantê-lo em condições funcionais adequadas, prolongando sua vida útil e mantendo a sua segurança operacional.

Desse modo, com base apenas nos valores previstos de PCI, realizar intervenções preventivas entre 2025 e 2028, quando a maioria das seções (entre 13% e 97%) está com a classificação Regular, poderia adiar a deterioração do pavimento até uma classificação Ruim, reduzindo os custos de manutenção. Além disso, entre 2034 e 2040 a maior parte das seções tem classificação Ruim, o que demandaria manutenções corretivas, com risco de reconstrução em 2045, período em que o pavimento encontra-se com 86,7% das suas seções em estado Muito Ruim e 13,3% em estado Péssimo.

Os resultados obtidos nesta seção indicam que realizar manutenções preventivas pode evitar uma deterioração precoce do pavimento e prolongar a sua vida útil, diminuindo os custos de M&R. Esse comportamento é consistente com os resultados de Babashamsi *et al.* (2022a), que observaram que a manutenção preventiva deve ocorrer quando as condições do pavimento ainda estão boas e o PCI entre 55 e 70. Adiar a manutenção preventiva em apenas um ano, resulta em custos de M&R 16% maiores (Babashamsi *et al.*, 2022a). O Apêndice 4 apresenta um QRcode para acessar as planilhas contendo os valores de PCI com suas respectivas classificações para todos os horizontes analisados.

#### 4.4 Resultados da resistência à derrapagem

Para os modelos de coeficiente de atrito e macrotextura foi utilizada a técnica de rede neurais recorrentes com adoção da rede *Gated Recurrent Unit* (GRU). Inicialmente, foi realizado o *GridSearch* para definir alguns hiperparâmetros da rede. Para o modelo de coeficiente de atrito, a normalização que apresentou melhores resultados foi a *RobusterScaler*. Essa técnica de normalização é utilizada para reduzir o impacto de *outliers*, que podem distorcer os dados. A normalização com o *RobusterScaler* utiliza a mediana e o intervalo interquartil (diferença entre o 1º e o 3º quartil), sendo mais robusta para conjuntos de dados que possuam valores extremos, como os dados de coeficiente de atrito da PPD estudada.

Em relação ao número de épocas, o modelo obteve melhor resultado com 200 épocas. O número de épocas é uma medida de quantas vezes o modelo vê o conjunto de dados durante o treinamento. O tamanho do lote ou *batch size* que apresentou a melhor performance foi 32. O *batch size* define o número de amostras de dados que o modelo processa antes de atualizar seus

parâmetros, ou seja, ele controla quantas amostras são passadas através da rede de uma vez em cada iteração durante uma época.

Dentre os otimizadores testados, o que apresentou melhor resultado foi o Nadam. O otimizador Nadam é uma variante do otimizador Adam, que combina os benefícios do Adam com a técnica de *Nesterov Accelerated Gradient* (NAG). Ele introduz melhorias na forma como os gradientes são calculados, resultando em um processo de treinamento mais eficiente e apresentando vantagens como convergência mais rápida, menor oscilação, melhor desempenho e adaptabilidade.

Para definição dos demais hiperparâmetros foi utilizada a otimização bayesiana. O modelo apresentou melhor resultado com duas camadas GRU e uma camada densa como saída. A primeira camada GRU possui 32 unidades e uma taxa de *dropout* de 0,3. A segunda camada GRU possui 192 unidades e uma taxa de *dropout* de 0,1. A taxa de aprendizagem do otimizador foi de 0,001. O *dropout* é uma técnica de regularização para evitar o *overfitting* ou sobre ajuste dos dados. Ela desativa aleatoriamente os neurônios de acordo com uma certa probabilidade. A taxa de aprendizado controla a magnitude das atualizações dos pesos do modelo durante o treinamento. A cada passo do treinamento, os pesos da rede são atualizados com base no gradiente da função de perda em relação a esses pesos. A taxa de aprendizado determina o tamanho desses passos.

A Tabela 33 apresenta um resumo de todos os hiperparâmetros utilizados no modelo de coeficiente de atrito. A Tabela 34 apresenta as métricas de avaliação do modelo na validação cruzada (média) e no conjunto de teste final, que correspondem aos dados que não foram vistos pelo modelo na etapa de treinamento. A Figura 33 apresenta um gráfico de dispersão entre os valores reais e os valores previstos para o coeficiente de atrito e a Figura 34 mostra o histograma dos resíduos.

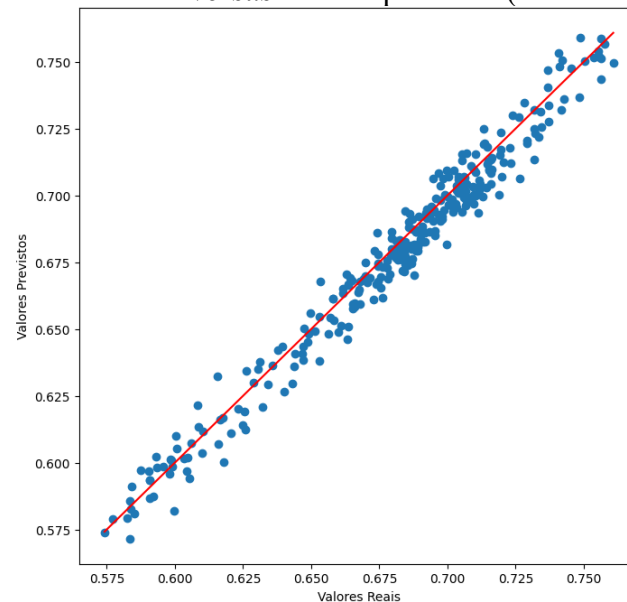
Tabela 32 - Hiperparâmetros do modelo de coeficiente de atrito.

<b>Normalizador</b>	<i>RobusterScaler</i>
<b>Otimizador</b>	Nadam
<b>Número de épocas</b>	200
<b><i>Batch size</i></b>	32
<b>Unidades (1º camada GRU)</b>	32
<b>Unidades (2º camada GRU)</b>	192
<b>Taxa de <i>dropout</i> (1º camada GRU)</b>	0,3
<b>Taxa de <i>dropout</i> (2º camada GRU)</b>	0,1
<b>Taxa de aprendizado</b>	0,001

Tabela 33 - Métricas de avaliação do modelo de coeficiente de atrito.

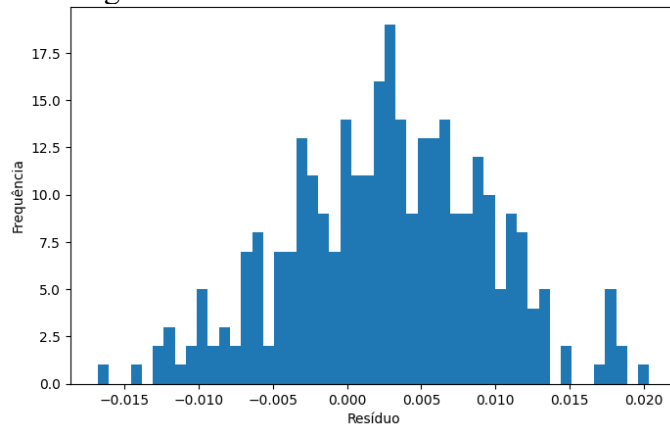
Validação Cruzada (média)		Conjunto de Teste	
<b>MSE</b>	0,0153	<b>MSE</b>	0,0059
<b>MAE</b>	0,0005	<b>MAE</b>	0,0001
<b>RMSE</b>	0,0205	<b>RMSE</b>	0,0073
<b>R<sup>2</sup></b>	0,8645	<b>R<sup>2</sup></b>	0,9662

Foi usada a validação cruzada *TimeSeriesSplit* com 5 *splits*. É possível perceber, pela Tabela 34, um desempenho adequado geral do modelo na validação cruzada, com um R<sup>2</sup> médio para os 5 *splits* de 0,86 e erros baixos. No conjunto de teste, o modelo também apresentou um desempenho adequado, com um R<sup>2</sup> de 0,97 e MAE de 0,0001. Isso mostra a adequação da técnica de rede GRU para o modelo de previsão de coeficiente de atrito.

Figura 33 - Valores reais *versus* valores previstos (coeficiente de atrito).

Observando a Figura 33, nota-se que os pontos estão próximos à linha de referência, o que sugere que há uma concordância adequada entre os valores reais e os valores previstos. Isso indica que o modelo possui um desempenho adequado para prever os dados. Existem alguns pontos que se afastam um pouco da linha de referência, indicando alguns erros de previsão, mas eles não parecem ser muito significativos, já que a dispersão é pequena. De modo geral, o gráfico da Figura 33 indica um ajuste satisfatório entre os valores reais e previstos, sugerindo que o modelo utilizado é adequado para a previsão do coeficiente de atrito.

Figura 34 - Histograma dos resíduos do modelo de coeficiente de atrito.



Observando a Figura 34, nota-se que o histograma dos resíduos apresenta uma forma aproximadamente simétrica em torno de zero, sugerindo que os resíduos estão distribuídos igualmente ao redor do valor previsto. Em um modelo bem ajustado, espera-se que os resíduos tenham uma distribuição normal centrada em zero, e, como pode ser observado na Figura 34, a maior parte dos resíduos está concentrada em torno de zero. Há alguns resíduos nas extremidades do histograma (em torno de -0,015 e 0,020), mas eles são poucos, o que sugere que a maioria dos erros está dentro de um intervalo aceitável, indicando que o modelo é adequado para previsão do coeficiente de atrito.

Para o modelo de macrotextura também foi utilizada a normalização *RobusterScaler*, que é uma técnica mais robusta para conjuntos de dados que possuam muitos *outliers*, como os dados de macrotextura da PPD estudada. Foram usadas 50 épocas e um *batch size* de 32 para o treinamento do modelo de macrotextura. Dentre os otimizadores testados, o que apresentou melhor resultado foi o *Root Mean Square Propagation* (RMSProp). O RMSProp é um otimizador adaptativo utilizado em cenários onde os gradientes variam em magnitudes muito diferentes para diferentes parâmetros. Ele possui a habilidade de ajustar automaticamente a taxa de aprendizado, tornando-o uma escolha comum para redes neurais recorrentes, como GRU.

O modelo de previsão da macrotextura também apresentou melhor resultado com duas camadas GRU e uma camada densa como saída. A primeira camada GRU possui 32 unidades e uma taxa de *dropout* de 0,3. A segunda camada GRU possui 96 unidades e uma taxa de *dropout* de 0,4. A taxa de aprendizado do otimizador foi de 0,001. A Tabela 34 apresenta um resumo de todos os hiperparâmetros utilizados no modelo de macrotextura. A Tabela 35 apresenta as métricas de avaliação do modelo na validação cruzada e no conjunto de teste. A Figura 35 apresenta um gráfico de dispersão entre os valores reais e os valores previstos para a macrotextura e a Figura 36 mostra o histograma dos resíduos.

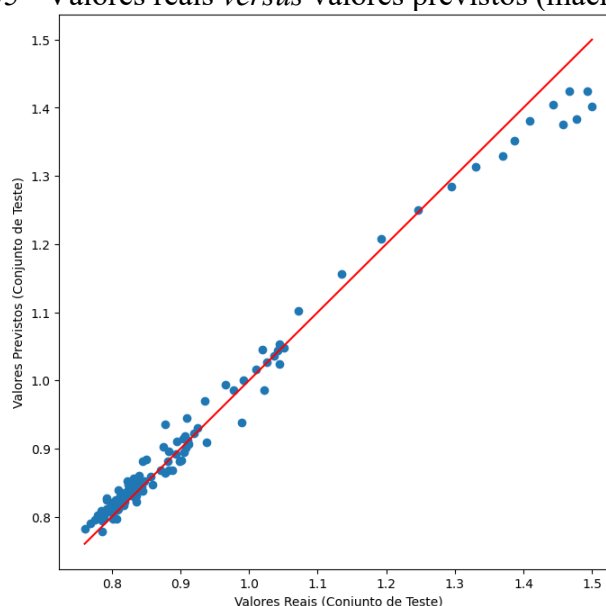
Tabela 34 - Hiperparâmetros do modelo de macrotextura.

<b>Normalizador</b>	<i>RobusterScaler</i>
<b>Otimizador</b>	RMSProp
<b>Número de épocas</b>	50
<b>Batch size</b>	32
<b>Unidades (1º camada RU)</b>	32
<b>Unidades (2º camada GRU)</b>	96
<b>Taxa de dropout (1º camada GRU)</b>	0,3
<b>Taxa de dropout (2º camada GRU)</b>	0,4
<b>Taxa de aprendizado</b>	0,001

Tabela 35 - Métricas de avaliação do modelo de macrotextura.

Validação Cruzada (média)		Conjunto de Teste	
<b>MSE</b>	0,0015	<b>MSE</b>	0,0006
<b>MAE</b>	0,0282	<b>MAE</b>	0,0176
<b>RMSE</b>	0,0361	<b>RMSE</b>	0,0241
<b>R<sup>2</sup></b>	0,9517	<b>R<sup>2</sup></b>	0,9813

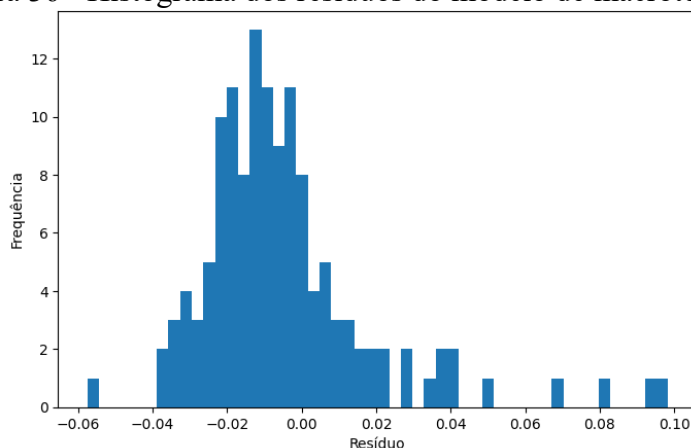
Observando a Tabela 35, é possível perceber que os erros foram, no geral, baixos, tanto na validação cruzada com o *TimeSeriesSplit* quanto no conjunto de teste final. O  $R^2$  no conjunto de teste, que correspondem aos dados que não foram apresentados a rede na fase de treinamento, foi de 0,98, indicando um ajuste satisfatório e adequação do modelo para previsão da macrotextura.

Figura 35 - Valores reais *versus* valores previstos (macrotextura).

Da Figura 35, percebe-se que a maioria dos pontos se alinha com a linha de referência, indicando que as previsões do modelo estão próximas dos valores reais para o conjunto de teste. Isso sugere que o modelo tem um desempenho adequado. Observa-se, no entanto, um desvio maior à medida que os valores reais aumentam, principalmente acima de 1,3 mm. Esses pontos desviam-se mais da linha de referência, o que indica que o modelo pode não estar prevendo

adequadamente para valores maiores. Apesar dos desvios para valores mais altos, a tendência geral é linear, o que sugere que, no geral, o modelo é capaz de capturar a relação entre as variáveis. Além disso, esse comportamento pode ter ocorrido devido ao tamanho limitado do banco de dados de macrotextura, com apenas 777 amostras. Estudos futuros, com um banco de dado ampliado, podem ajudar a minimizar esses erros e melhorar a previsão do modelo de macrotextura.

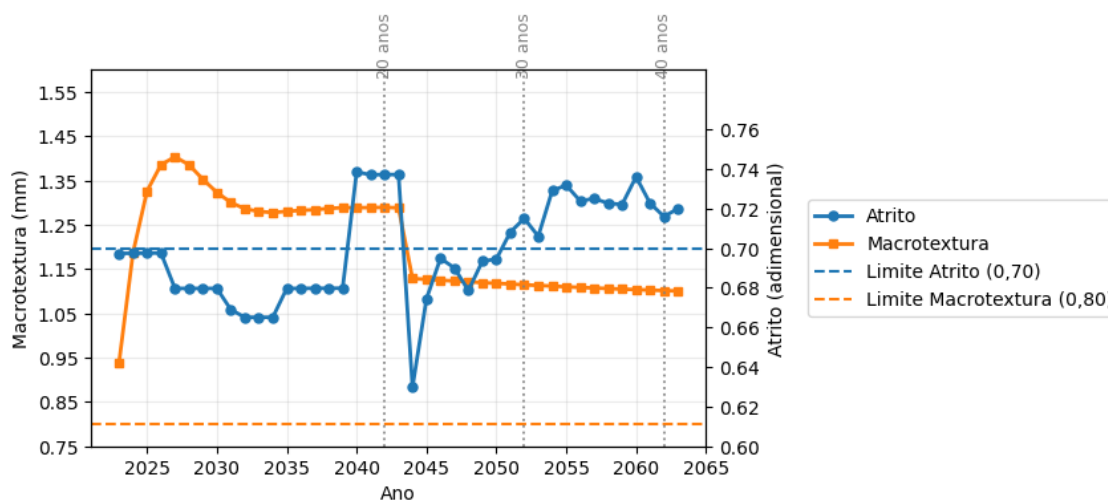
Figura 36 - Histograma dos resíduos do modelo de macrotextura.



A distribuição dos resíduos, observada na Figura 36, está levemente inclinada para a esquerda, com uma concentração maior em valores negativos em comparação com valores positivos. Isso pode indicar que o modelo tende a superestimar levemente os valores reais, resultando em resíduos negativos mais frequentes. No entanto, apesar da assimetria, a maioria dos resíduos está próxima de zero, o que é uma indicação de que o modelo está acertando a maioria das previsões. Observa-se uma dispersão maior em valores positivos de resíduos, com alguns pontos se estendendo até 0,10. De modo geral, o modelo parece adequado para previsão da macrotextura.

Com os modelos de coeficiente de atrito e macrotextura foi possível prever os valores futuros dos parâmetros para os períodos de 20 anos, 30 anos e 40 anos, com o ano de referência 2023, e classificar a resistência à derrapagem. A Figura 37 mostra a evolução, por ano, da mediana dos valores previstos de coeficiente de atrito e macrotextura e a Tabela 36 apresenta a previsão da classificação da resistência à derrapagem da PPD.

Figura 37 - Evolução dos parâmetros de resistência à derrapagem ao longo do tempo.



Os modelos de previsão de coeficiente de atrito e macrot textura mostram a previsão dos parâmetros mês a mês. Para fazer uma análise da evolução desses parâmetros por ano, utilizou-se a mediana dos valores mensais previstos, pois como visto na análise descritiva e no estudo de Maia, Oliveira e Da Silva (2023), ela é mais representativa. Pela Figura 37, percebe-se um comportamento cíclico e decrescimento para o coeficiente de atrito e uma tendência de crescimento inicial, com posterior decrescimento para a macrot textura, considerando os primeiros 20 anos da análise. Esse comportamento também foi observado na análise descritiva e no estudo de Quariguasi *et al.* (2018), indicando que os modelos parecem estar prevendo adequadamente a tendência da evolução desses parâmetros ao longo do tempo.

É importante destacar que os modelos consideram as manutenções periódicas de remoção de borracha, realizadas a cada 6 meses (ANAC, 2023a), o que explica o comportamento cíclico do coeficiente de atrito e o motivo pelo qual a macrot textura, mesmo apresentando desgaste superficial, como demonstrado pela diminuição do seu valor, não atinge patamares inferiores ao limite mínimo especificado. Os modelos também incluem a reabilitação do revestimento da PPD ocorrida em 2020, incorporando a melhora do coeficiente de atrito e diminuição da macrot textura após essa intervenção (Maia *et al.*, 2023). Isso se reflete, na Figura 37, no aumento dos valores do coeficiente de atrito, entre 2040 e 2044, e a partir de 2051, períodos em que o coeficiente de atrito é superior ao mínimo especificado nesta pesquisa.

Tabela 36 - Previsão da classificação da resistência à derrapagem da PPD.

<i>Ano</i>	<i>Coefficiente de atrito</i>	<i>Macrot textura (mm)</i>	<i>Classificação</i>
2023	0.6974	0.9393	Não adequada
2024	0.6975	1.1874	Não adequada
2025	0.6976	1.3264	Não adequada
2026	0.6976	1.3859	Não adequada
2027	0.6797	1.4039	Não adequada
2028	0.6797	1.3860	Não adequada
2029	0.6797	1.3531	Não adequada
2030	0.6797	1.3234	Não adequada
2031	0.6690	1.3007	Não adequada
2032	0.6651	1.2866	Não adequada
2033	0.6651	1.2804	Não adequada
2034	0.6651	1.2781	Não adequada
2035	0.6797	1.2806	Não adequada
2036	0.6797	1.2828	Não adequada
2037	0.6798	1.2844	Não adequada
2038	0.6798	1.2872	Não adequada
2039	0.6798	1.2891	Não adequada
2040	0.7385	1.2889	Não adequada
2041	0.7371	1.2892	Não adequada
2042	0.7372	1.2897	Não adequada
2043	0.7372	1.2887	Não adequada
<u>2044</u>	<u>0.6298</u>	<u>1.1289</u>	<u>Não adequada</u>
<u>2045</u>	<u>0.6745</u>	<u>1.1269</u>	<u>Não adequada</u>
<u>2046</u>	<u>0.6949</u>	<u>1.1250</u>	<u>Não adequada</u>
<u>2047</u>	<u>0.6900</u>	<u>1.1233</u>	<u>Não adequada</u>
<u>2048</u>	<u>0.6786</u>	<u>1.1216</u>	<u>Não adequada</u>
<u>2049</u>	<u>0.6935</u>	<u>1.1196</u>	<u>Não adequada</u>
<u>2050</u>	<u>0.6945</u>	<u>1.1180</u>	<u>Não adequada</u>
<u>2051</u>	<u>0.7081</u>	<u>1.1165</u>	<u>Adequada</u>
<u>2052</u>	<u>0.7150</u>	<u>1.1147</u>	<u>Adequada</u>
<u>2053</u>	<u>0.7060</u>	<u>1.1133</u>	<u>Adequada</u>
2054	0.7291	1.1117	Adequada
2055	0.7318	1.1103	Adequada
2056	0.7239	1.1087	Adequada
2057	0.7250	1.1075	Adequada
2058	0.7227	1.1063	Adequada
2059	0.7221	1.1049	Adequada
2060	0.7360	1.1038	Adequada
2061	0.7227	1.1027	Adequada
2062	0.7160	1.1017	Adequada
2063	0.7200	1.1007	Adequada

ANAC (2023a) estabelece o limite mínimo de manutenção do coeficiente de atrito igual a 0,53 e para a macrotextura de 0,60 mm. No entanto, entende-se que, para que a resistência à derrapagem seja considerada adequada e a segurança operacional da PPD seja garantida, deve-se considerar uma certa folga em relação aos limites mínimos. Para PPD com revestimentos em Concreto Asfáltico, a segurança operacional é adequada se o coeficiente de atrito e a macrotextura possuírem valores superiores a 0,70 e 0,80 mm, respectivamente (Maia *et al.*, 2025).

A partir da Tabela 36, observa-se que no horizonte de 20 anos (2024–2043) o coeficiente de atrito permanece acima do limite mínimo da ANAC (0,53) em todos os anos, ficando abaixo de 0,70 em 80% do período (2024–2039) e acima desse limiar nos últimos 20% (2040–2043). No horizonte de 30 anos (2024–2053), o coeficiente de atrito permanece abaixo de 0,70 em 76,7% do período, apresentando valores superiores a 0,70 em 23,3% dos anos, especialmente entre 2040–2043 e 2051–2053. Para o horizonte de 40 anos (2024–2063), o coeficiente de atrito fica abaixo de 0,70 em 57,5% dos anos e acima desse limite em 42,5% do período, com desempenho superior a 0,70 entre 2040–2043 e de 2051 a 2063. Em todos os horizontes avaliados (20 anos, 30 anos e 40 anos), a macrotextura permanece acima de 1,10, atendendo aos requisitos mínimos estabelecidos por ANAC (2023a) e Maia *et al.* (2025). Isso significa que o parâmetro limite em relação ao desempenho frente à segurança operacional da PPD é o coeficiente de atrito.

Esses resultados reforçam a necessidade de acompanhar os parâmetros de resistência à derrapagem ao longo do tempo. Além disso, as manutenções periódicas de remoção de borracha podem não ser suficientes para manter a segurança operacional da PPD no longo prazo, principalmente no que diz respeito ao coeficiente de atrito. Outras atividades de M&R, como retexturização ou aplicação de microrrevestimento, devem ser realizadas para manter as condições de resistência adequadas. Essas evidências corroboram com os resultados de Sales, Oliveira e Prado (2021).

#### **4.5 Resultados da avaliação estrutural**

A avaliação estrutural da pista de pouso e decolagem foi realizada para determinar o *Cumulative Damage Factor* (CDF) e a vida útil remanescente da PPD. O Sub CDF, que corresponde ao CDF no topo do subleito, apresentou valor igual a 0,00 em todas as análises (20 anos, 30 anos e 40 anos) no primeiro e no segundo trecho. O HMA CDF, que corresponde ao

CDF no revestimento, apresentou um valor igual a 0,01, para o primeiro trecho e 0,00 no segundo para 20 anos, 30 anos e 40 anos. Como o CDF foi inferior a 0,85, valor limite estabelecido nesta pesquisa, a condição estrutural da PPD pode ser considerada adequada.

No entanto, a análise estrutural indicou uma vida de projeto virtualmente infinita. A vida útil remanescente foi de 8.170,9 anos para o primeiro trecho e 8.068,9 para o segundo, indicando que o pavimento pode estar superdimensionado. Além disso, o CDF foi inferior 0,15, indicando mais uma vez o superdimensionamento da estrutura (ANAC, 2020). Isso pode ter sido causado pela espessura robusta, principalmente, da camada de revestimento, que possui 30 cm no primeiro trecho e 38 cm no segundo. A espessura total do pavimento da PPD é de 86 cm no primeiro trecho e 94 cm no segundo, podendo ser considerado um pavimento robusto para o *mix* de aeronaves que solicitará a PPD nos períodos analisados. Resultado semelhante foi obtido por Chaves e Oliveira (2024) para a mesma PPD deste estudo, em uma análise para 20 anos.

Isso pode representar uma limitação do método empregado neste estudo, uma vez que o superdimensionamento da estrutura pode favorecer a ocorrência de mecanismos de degradação dos materiais ao longo do tempo, mesmo quando a capacidade estrutural permanece adequada. Um exemplo disso é a oxidação do ligante asfáltico, que tende a tornar o material mais rígido e suscetível ao surgimento de trincas no revestimento. Esse comportamento indica que o CDF, embora seja um importante indicador estrutural, pode não ser suficiente para representar todos os processos de deterioração quando o pavimento apresenta elevada capacidade estrutural.

Dessa forma, os resultados obtidos evidenciam a necessidade de reavaliar os critérios de dimensionamento estrutural em futuras intervenções, buscando um equilíbrio entre capacidade estrutural e eficiência econômica. Um projeto estrutural mais ajustado às condições reais de carregamento pode contribuir para a redução dos custos de construção, sem comprometer a durabilidade e o desempenho do pavimento, resultado que também foi observado por Chaves e Oliveira (2024).

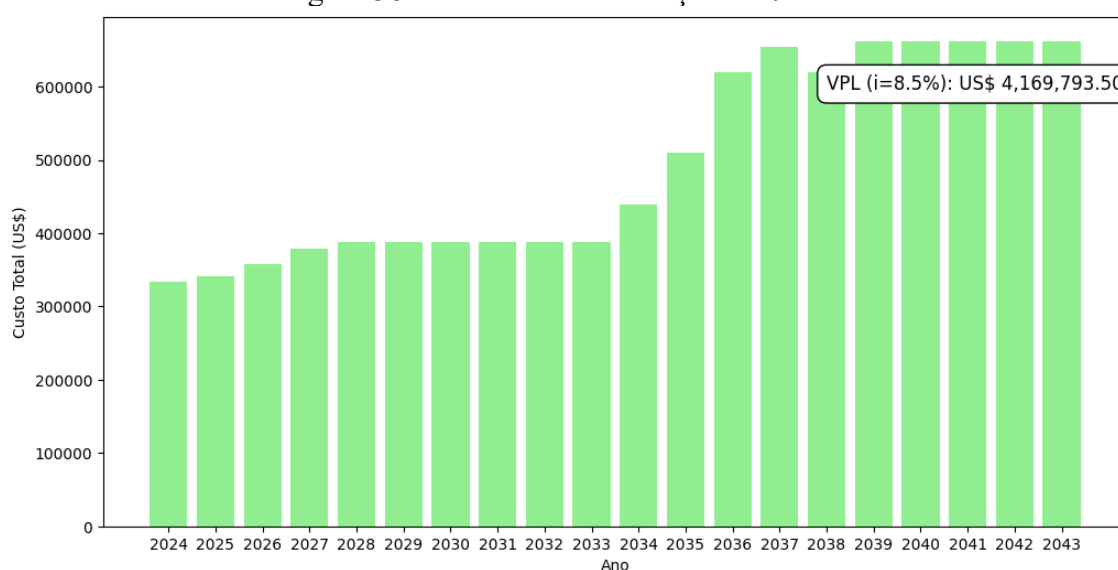
Além disso, o modelo de previsão do PCI indicou uma deterioração progressiva da condição superficial do revestimento ao longo do tempo. Esse comportamento sugere que, durante os horizontes analisados, as necessidades de manutenção e reabilitação (M&R) tendem a se concentrar predominantemente em intervenções de caráter funcional, como manutenções preventivas e corretivas, voltadas à preservação da superfície. Isso ocorre porque, apesar da degradação funcional observada, a estrutura da PPD demonstrou-se suficientemente robusta, não havendo evidências de necessidade de intervenções estruturais nos períodos avaliados.

Assim, a combinação entre deterioração funcional do revestimento e elevada capacidade estrutural da estrutura reforça a importância de estratégias de manutenção direcionadas à preservação das condições superficiais do pavimento. Ao mesmo tempo, esses resultados apontam para oportunidades de aprimoramento no dimensionamento estrutural, de modo a otimizar os investimentos iniciais e reduzir custos ao longo do ciclo de vida do pavimento.

#### 4.6 Resultados da Análise de Custo de Ciclo de Vida (ACCV)

Para a Análise de Custo do Ciclo de Vida (ACCV), foram considerados apenas os custos diretos de manutenção e reabilitação (M&R). Com os valores previstos de *Pavement Condition Index* (PCI), de parâmetros de resistência à derrapagem e de *Cumulative Damage Factor* (CDF) foi possível determinar as necessidades de M&R na pista de pouso e decolagem (PPD) e calcular os custos para cada seção, usando os valores da Tabela 45, no Apêndice 1. Foi considerado que, nos períodos de 20 anos, 30 anos e 40 anos, nenhuma obra de reabilitação foi realizada, e foi utilizada a árvore de decisão elaborada nessa pesquisa. Vale ressaltar que, devido ao superdimensionamento da estrutura da PPD, nenhuma intervenção estrutural foi inicialmente considerada nos horizontes analisados. Portanto, as intervenções se concentram em remoção de borracha, manutenção preventiva e manutenção corretiva. O VPL Monetário para o período de 20 anos resultou em US\$ 4.169.793,50. Esse valor considera os custos totais ajustados pela taxa de desconto de 8,5% a.a. para calcular o impacto financeiro atual. A Figura 38 apresenta os custos de manutenção por ano para a PPD estudada para o horizonte de 20 anos. O VPL calculado nesta pesquisa considera apenas os custos.

Figura 38 - Custos de manutenção – 20 anos.



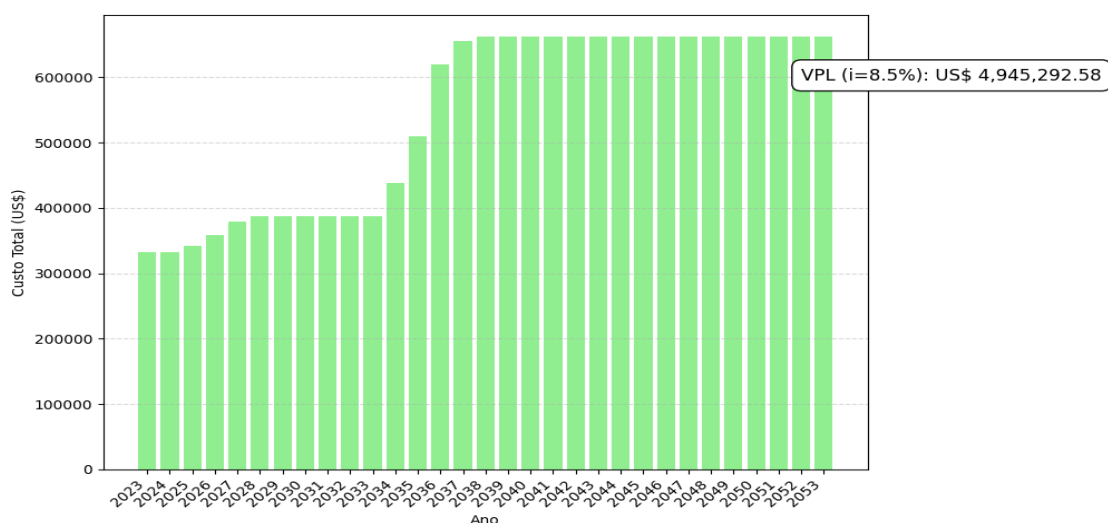
Observando a Figura 38, é possível perceber que, de modo geral, os custos de manutenção aumentam ao longo dos anos. Esse crescimento pode ser atribuído ao aumento das necessidades, principalmente, de manutenção corretiva à medida que a infraestrutura aproxima-se do final de sua vida útil. No ano de 2038, nota-se uma diminuição dos custos em relação a 2037 (cerca de US\$ 655 mil em 2037 e US\$ 620 mil em 2038), devido a uma menor quantidade de seções necessitando de manutenções corretivas em 2038, que possuem custo maior.

Os custos de manutenção mantêm-se baixos até aproximadamente 2033 (cerca de US\$ 388 mil), quando começam a crescer de maneira mais acelerada. Esse comportamento pode indicar que as condições do pavimento pioram mais rapidamente a partir desse período, exigindo intervenções de maior custo. Até 2033, as manutenções se concentram em remoção de borracha e manutenção preventiva, mas a partir de 2034 há necessidade de manutenções corretivas na PPD, que são mais onerosas.

O custo de manutenção continua a aumentar até atingir seu maior valor em 2039 (cerca de US\$ 662 mil). A partir desse ano, os custos se mantêm constantes, sugerindo que manutenções corretivas, de custos mais elevados, são necessárias de forma recorrente a partir dessa data. Esse padrão sugere que os custos das intervenções de manutenção tornam-se mais elevadas com o passar do tempo e que o pavimento requer intervenções frequentes e onerosas nos últimos anos do período (2039 em diante), indicando que o ciclo de vida está terminando e medidas mais caras são necessárias para manter a operacionalidade.

Os custos de manutenção nos primeiros anos (até 2033), quando são necessárias apenas manutenções preventivas e remoções de borracha, são 41,5% mais baixos do que os custos de manutenções corretivas no final do período (2039 em diante), mostrando a importância desse tipo de intervenção. O aumento nos custos de manutenção indica a necessidade de uma estratégia de gerenciamento efetiva para minimizar esses custos ao longo do tempo. Planejar intervenções de manutenção preventiva de forma mais racional poderia ajudar a controlar esses custos crescentes no longo prazo. O VPL Monetário demonstra que esses custos são elevados quando considerados para o valor presente, reforçando a importância de uma abordagem otimizada para a manutenção ao longo dos anos. A Figura 39 mostra o VPL Monetário e os custos de manutenção para o horizonte de 30 anos.

Figura 39 - Custos de Manutenção - 30 anos.

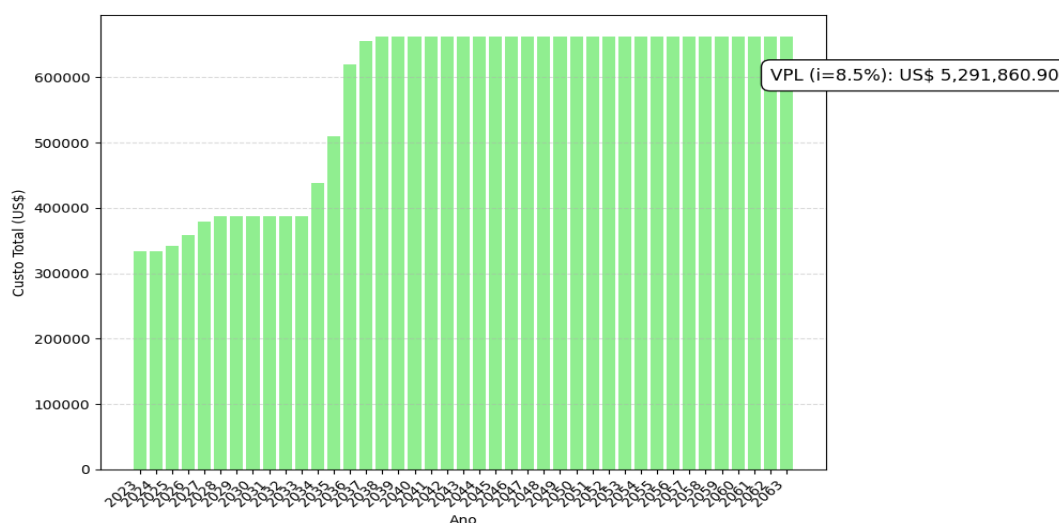


Observando a Figura 39, percebe-se que quando o horizonte foi estendido para 30 anos, o VPL Monetário para uma taxa de desconto de 8,5% a.a. aumentou para US\$ 4.945.292,58, evidenciando que os últimos dez anos adicionam mais de US\$ 775 no VPL. Isso ocorreu em função da maior utilização de estratégias mais onerosas, como a manutenção corretiva, no final do período.

Entre 2024 e 2027, os custos de M&R crescem gradualmente, mas de 2028 até 2034 ocorre uma estabilização nos custos, com valores em torno de US\$ 388 mil, assim como tinha sido observado para o horizonte de 20 anos. A partir de 2035, os custos crescem de forma acentuada. Esse padrão revela a transição de um ciclo inicial de manutenção preventiva e remoção de borracha para um ciclo posterior de manutenções corretivas, que aumentam até atingir o valor máximo em 2039 (US\$ 662.395,94) e passam a se repetir de forma constante até o final do período, em 2053.

Apesar do custo acumulado ser elevado, os gastos concentram-se em determinados momentos do ciclo de vida. Essa característica reforça a importância do planejamento orçamentário de longo prazo e da avaliação de cenários alternativos de manutenção, como a priorização de manutenção preventiva, de modo a equilibrar o esforço financeiro e garantir a sustentabilidade do pavimento da PPD. A Figura 40 apresenta o VPL Monetário e os custos de M&R considerando o período de 40 anos.

Figura 40 - Custos de manutenção - 40 anos.



Para o horizonte de tempo de 40 anos (Figura 40), o VPL Monetário para uma taxa de desconto de 8,5% a.a. foi US\$ 5.291.860,90, representando um acréscimo de cerca de US\$ 346 mil em relação ao período de 30 anos. Isso mostra que a maior parte das manutenções corretivas já havia ocorrido até o ano 30 e o efeito do desconto de 8,5% a.a. reduz o peso dos fluxos de caixa da quarta década. O VPL de cerca de US\$ 5,3 milhões, demonstra que, embora os custos acumulados sejam elevados, parte relevante do impacto econômico é atenuada pelo efeito do desconto ao longo do tempo.

Portanto, os resultados dessa seção sugerem que, embora a ampliação do horizonte de análise forneça uma visão mais abrangente do ciclo de vida do pavimento, um período de 30 anos mostra-se suficiente para captar os principais custos de M&R e subsidiar decisões de planejamento de longo prazo para o gerenciamento do pavimento da PPD. A Tabela 37 apresenta um resumo dos resultados dessa seção. No Apêndice 5 encontra-se um *QRcode* para acessar as planilhas contendo as estratégias de manutenção e os custos de cada seção para todos os horizontes analisados.

Tabela 37 - Resumo – Custos de M&amp;R.

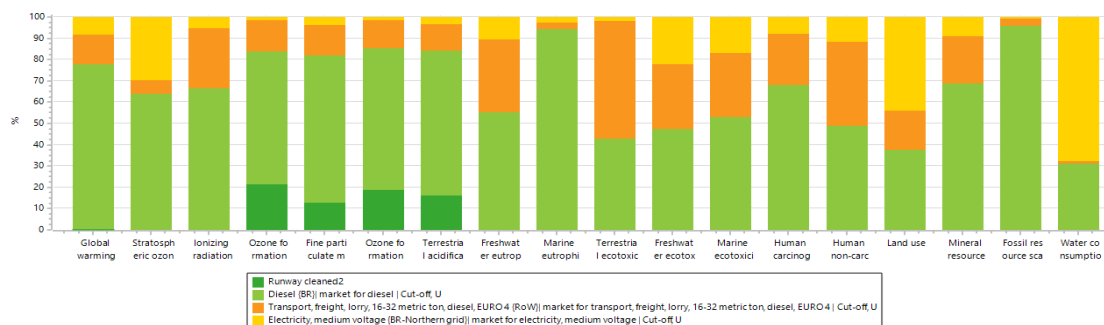
Horizonte	VPL Monetário (US\$)	Comparação com o período anterior
20 anos	4.169.793,50	-
30 anos	4.945.292,58	+775.499,08
40 anos	5.291.860,90	+346.568,32

#### 4.7 Resultados da Análise de Ciclo de Vida (ACV)

A Análise de Ciclo de Vida (ACV) foi realizada no *software* SimaPro versão 10.0.2 Demo, usando o método ReCiPe 2016 Midpoint H. Esse método calcula o potencial de mudanças climáticas para o longo prazo (100 anos). A ACV foi calculada para 1 m<sup>2</sup> de pista.

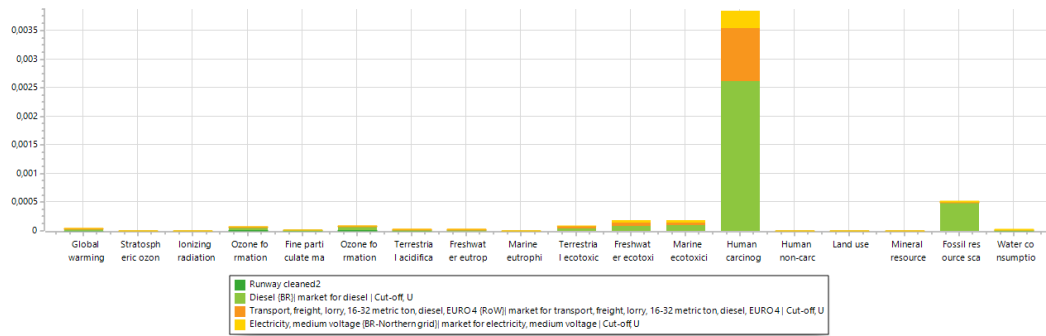
Os serviços considerados foram remoção de borracha, microrrevestimento (manutenção preventiva), recapeamento de 5 cm de espessura, com fresagem (manutenção corretiva), reforço estrutural de 10 cm, reconstrução total do pavimento e reabilitação do revestimento asfáltico, com fresagem do revestimento existente e construção de um novo revestimento com Concreto Asfáltico modificado por polímero. Para a reconstrução total foram consideradas espessuras mínimas construtivas para as camadas de base, sub-base e revestimento, sendo 7,5 cm de revestimento, 15 cm de base e sub-base (FAA, 2016). Isso foi feito para representar uma futura revisão do projeto estrutural devido ao superdimensionamento da PPD. A reabilitação do revestimento considerou a espessura do revestimento da PPD estudada. As Figuras 41 e 42 apresentam os resultados para o serviço de remoção de borracha. Foi realizada a análise de caracterização e normalização por categoria de impactos ambientais.

Figura 41 - ACV - Remoção de Borracha (caracterização).



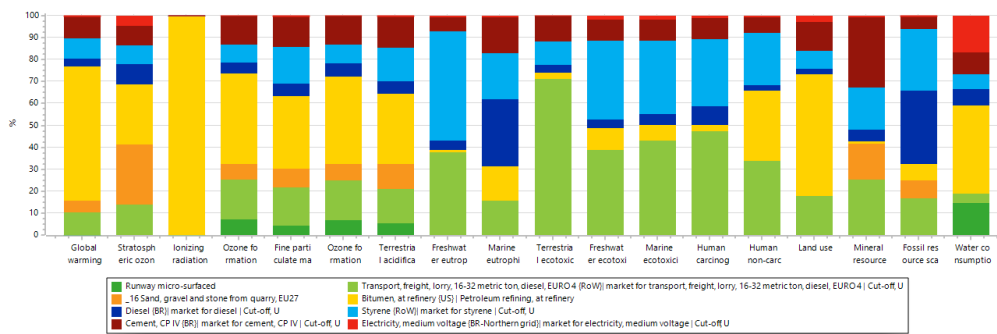
Observando a Figura 41, percebe-se que os principais impactos ambientais identificados foram o aquecimento global (*global warming* - 0,362 kg CO<sub>2e</sub>), a escassez de recursos fósseis e a eutrofização marinha. Nessas categorias, o diesel foi o material que mais contribuiu para o impacto ambiental, representando mais de 75% do aquecimento global e cerca de 96% da escassez de recursos fósseis. O transporte apresentou impacto relevante em ecotoxicidade terrestre (aproximadamente 60%), enquanto a eletricidade foi responsável pela maior parcela do consumo de água (aproximadamente 70%). A contribuição direta do processo de pista limpa foi pequena em comparação às demais fontes. O valor de 0,362 kg de CO<sub>2e</sub> pode ser considerado baixo para um serviço de manutenção em PPD.

Figura 42 - ACV - Remoção de Borracha (normalização).



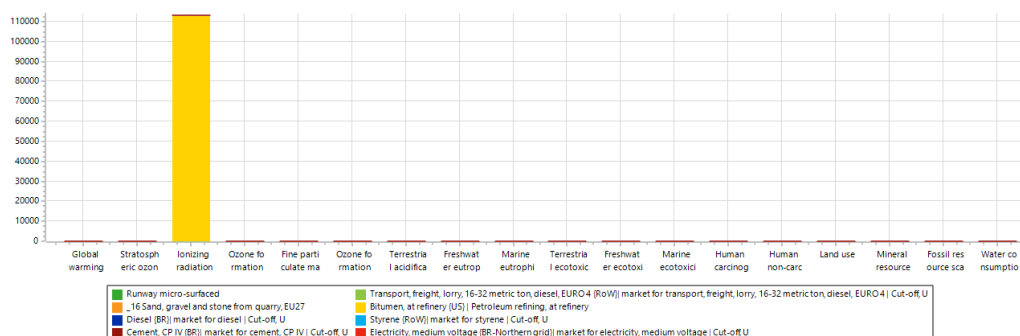
Na Figura 42, que mostra os resultados após a normalização, observa-se que a toxicidade humana carcinogênica e a escassez de recursos fósseis são as categorias de impacto que possuem maior importância relativa. Para o serviço de remoção de borracha, as estratégias de mitigação devem se concentrar principalmente na diminuição do consumo de diesel, uma vez que em ambas as análises, a escassez de recursos fósseis apareceu como uma das categorias de maior impacto ambiental e responde pela maior parcela no aquecimento global (0,279 kg de CO<sub>2e</sub> ou 77%). Isso pode ser realizado usando equipamentos e processos mais eficientes ou substituindo combustíveis fósseis por biocombustíveis. As Figuras 43 e 44 mostram os resultados para o serviço de microrrevestimento asfáltico.

Figura 43 - ACV - Microrrevestimento (caracterização).



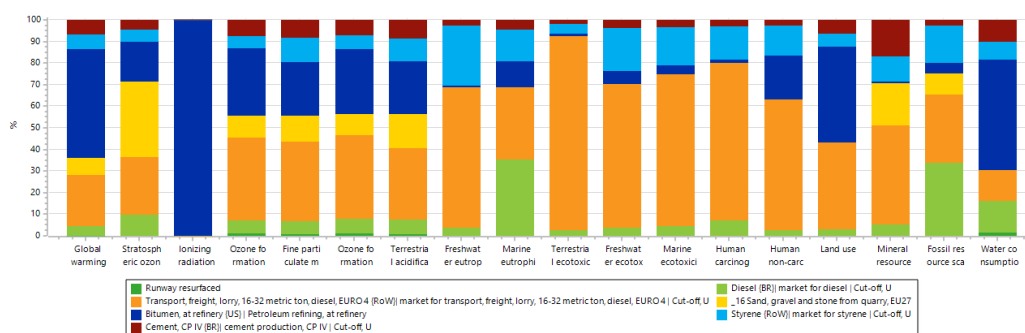
A análise da Figura 43 mostra que o betume (ligante asfáltico) e o cimento usado como filer foram os principais responsáveis pelo aquecimento global, que gerou 1,85 kg de CO<sub>2e</sub>. O betume também foi responsável por aproximadamente 100% do impacto de radiação ionizante. O diesel apresentou impacto relevante nas categorias de eutrofização marinha e escassez de recursos fósseis. O transporte foi o principal responsável pelo impacto de ecotoxicidade terrestre, enquanto o polímero obteve um maior impacto sobre a eutrofização de água doce. As emissões de CO<sub>2e</sub> foram maiores em comparação ao serviço de remoção de borracha devido, principalmente, ao uso do betume.

Figura 44 - ACV - Microrrevestimento (normalização).



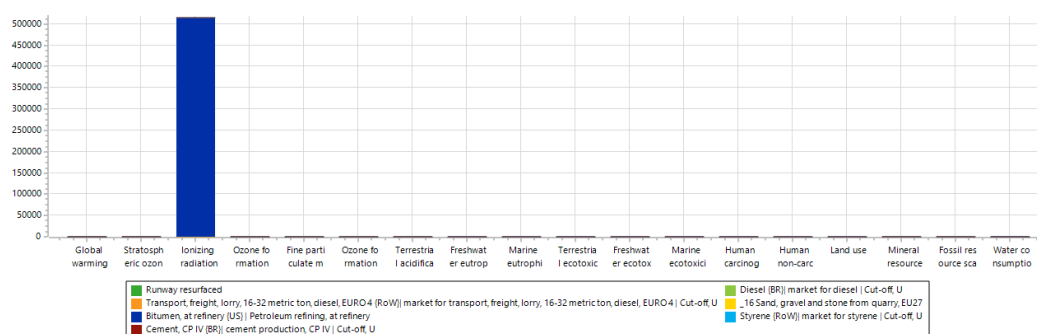
A normalização dos impactos ambientais (Figura 44) evidencia o predomínio da radiação ionizante como principal categoria de impacto no serviço de microrrevestimento. Esse impacto está associado à cadeia de produção do asfalto. Nas demais categorias de impacto, nota-se uma contribuição menor do cimento. Como estratégias de mitigação devem-se priorizar a redução ou substituição do betume e do cimento por materiais alternativos, além de considerar as melhorias de eficiência no uso de diesel, que segue como um dos contribuintes relevantes para as emissões absolutas. As Figuras 45 e 46 mostram os resultados para o serviço de recapeamento.

Figura 45 - ACV - Recapeamento (caracterização).



Analisando a Figura 45, percebe-se que o betume (ligante asfáltico) é responsável por aproximadamente 100% do impacto de radiação ionizante e é o principal responsável pelo aquecimento global, que gerou 10,3 kg de CO<sub>2e</sub>. O transporte tem influência relevante em todas as categorias, contribuindo para mais de 80% do impacto de ecotoxicidade terrestre. O diesel afeta principalmente os impactos relacionados à escassez de recursos fósseis e a eutrofização marinha, corroborando com os resultados anteriores, enquanto os agregados (brita e areia) impactam mais na redução da camada de ozônio (aproximadamente 30%). As emissões de CO<sub>2e</sub> foram maiores em comparação ao serviço de microrrevestimento devido ao maior consumo de materiais e maior distância de transporte.

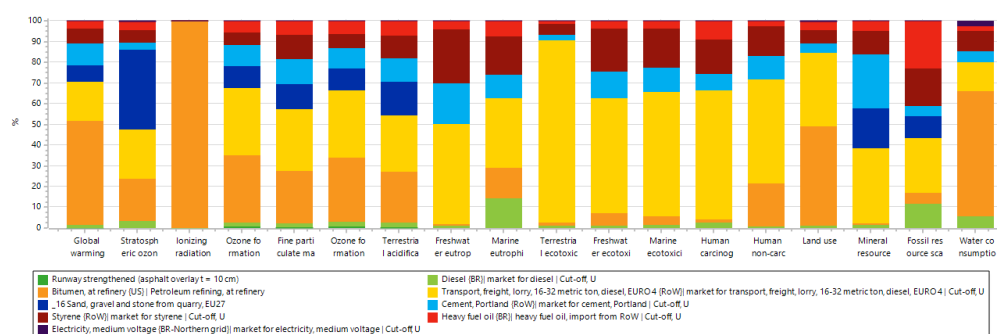
Figura 46 - Recapeamento (normalização).



Observando a Figura 46, nota-se o mesmo comportamento do serviço de microrrevestimento, no qual a radiação ionizante aparece como principal categoria de impacto relativo. Isso está relacionado a utilização de uma maior quantidade de betume (ligante asfáltico) no recapeamento em relação ao serviço de microrrevestimento.

Como estratégias de mitigação devem-se priorizar a redução ou substituição do ligante asfáltico por materiais alternativos, melhorar a eficiência no uso de diesel e diminuir as distâncias de transportes. Além disso, incorporar os resíduos da fresagem podem ajudar a diminuir os impactos ambientais, gerando créditos por evitação, que correspondem aos benefícios ambientais contabilizados quando um processo evita que outro processo ocorra. Um exemplo é quando ocorre a reciclagem de algum material ou extensão da vida útil da estrutura, resultando na redução de emissões em relação ao processo convencional. As Figuras 47 e 48 mostram os resultados para o serviço de reforço.

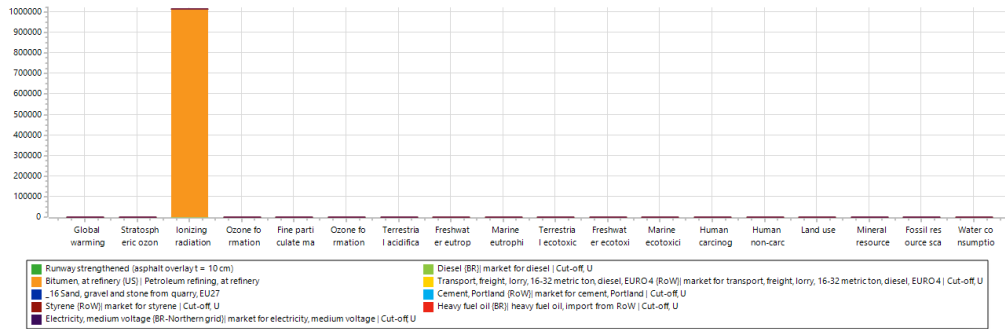
Figura 47 - ACV - Reforço (caracterização).



Observando a Figura 47, percebe-se que o betume (ligante asfáltico) contribui com aproximadamente 50% para o aquecimento global e aproximadamente 100% para a radiação ionizante, tendo participação no consumo de água e uso da terra (mais de 50%). Nas demais categorias de impacto, o principal fator contribuinte é o transporte, sendo responsável por mais de 80% da ecotoxicidade terrestre. Na escassez de recursos fósseis os materiais que mais impactam são o diesel e os óleos combustíveis, além do transporte. O aquecimento global

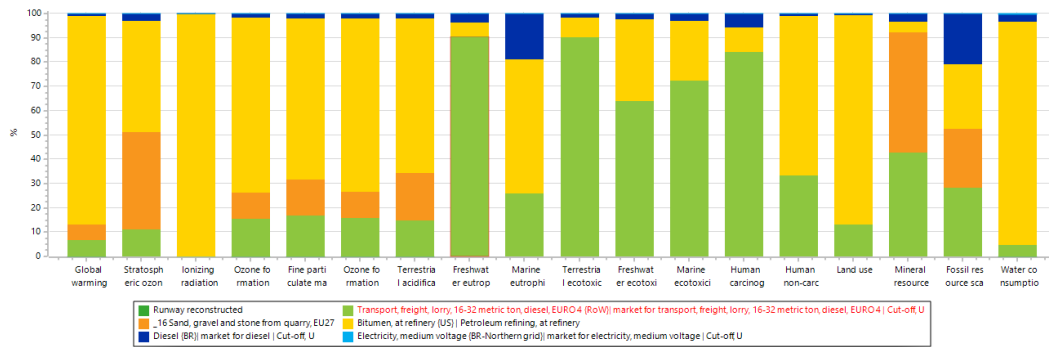
resultou em 20,3 kg de CO<sub>2e</sub>, representando um impacto ambiental maior que o serviço de reaparelamento (aumento de 10 kg de CO<sub>2e</sub> por m<sup>2</sup>).

Figura 48 - ACV - Reforço (normalização).



Da Figura 48, nota-se o mesmo comportamento dos serviços de microrrevestimento e reaparelamento, no qual a radiação ionizante aparece como principal categoria de impacto relativo devido ao maior consumo de betume. Como estratégias de mitigação devem-se priorizar a redução ou substituição do ligante asfáltico e agregados por materiais alternativos, melhorar a eficiência no uso de diesel e óleos combustíveis e diminuir as distâncias de transportes, melhorando as operações de logística. As Figuras 49 e 50 mostram os resultados para o serviço de reconstrução.

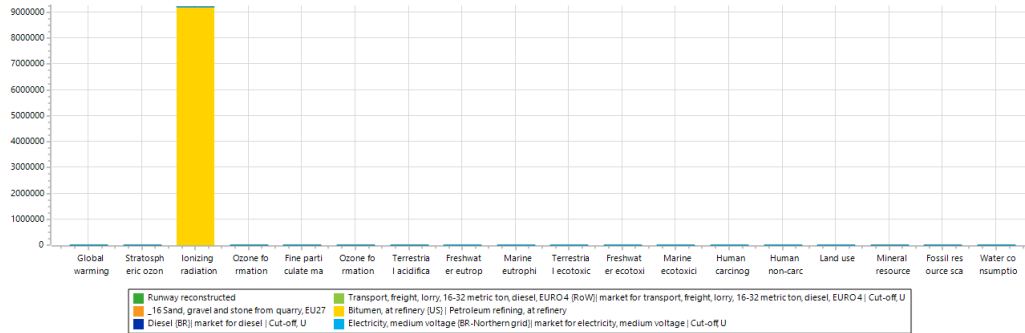
Figura 49 - ACV - Reconstrução (caracterização).



Da Figura 49 percebe-se que os principais fatores causadores de impacto ambiental são o betume (ligante asfáltico) e o transporte. O betume é responsável por mais 80% do aquecimento global e aproximadamente 100% da radiação ionizante, enquanto o transporte é responsável por aproximadamente 90% da ecotoxicidade terrestre e eutrofização de água doce. O diesel tem importância para a escassez de recursos fósseis e eutrofização marinha, como já havia sido observado nos serviços anteriores. A utilização de agregados (areia e brita) possui maior influência na escassez de recursos minerais e redução da camada de ozônio. O aquecimento global resultou em um valor elevado, de 107 kg de CO<sub>2e</sub>. Como visto na Figura

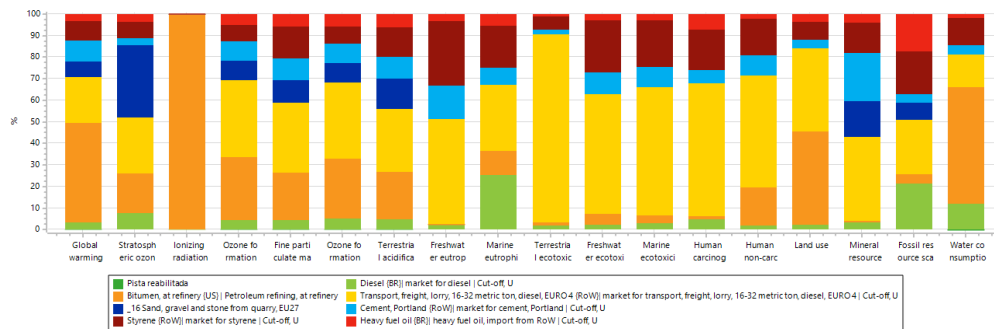
49, a maior parte do impacto foi devido ao consumo de material, principalmente o betume, com uma menor contribuição dos agregados.

Figura 50 - ACV - Reconstrução (normalização).



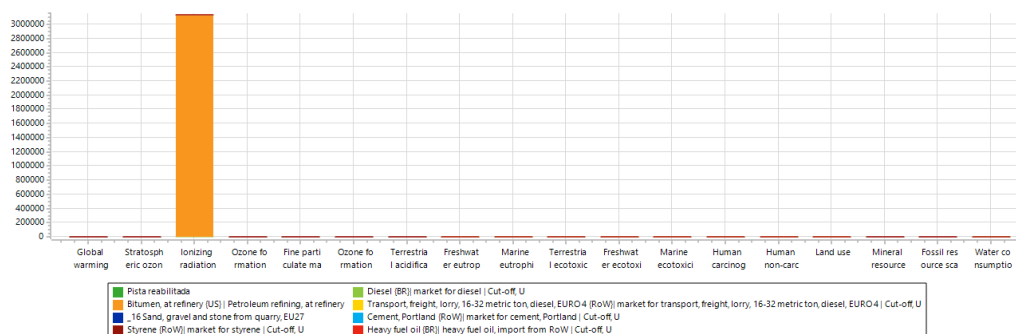
A Figura 50, apresenta o mesmo comportamento dos demais serviços de M&R que utilizam betume, no qual a radiação ionizante aparece como principal categoria de impacto relativo. Por fim, as Figuras 51 e 52 mostram os resultados para o serviço de reabilitação do revestimento.

Figura 51 - ACV - Reabilitação (caracterização).



A partir da Figura 51, observa-se que o betume (ligante asfáltico) e o transporte são os principais responsáveis pela maioria dos impactos ambientais. O betume contribui para aproximadamente 50% do aquecimento global e aproximadamente 100% da radiação ionizante, enquanto o transporte contribui para aproximadamente 90% da ecotoxicidade terrestre. O consumo de agregados afeta uma parcela da redução da camada de ozônio (aproximadamente 35%). O cimento usado como filer e o polímero contribuem de forma relevante para todas as categorias de impacto. O diesel possui maior influência na escassez de recursos fósseis e eutrofização marinha, corroborando com os resultados anteriores. Por sua vez, os óleos combustíveis afetam mais a eutrofização de água doce. O valor do aquecimento global foi de 67,9 kg de CO<sub>2e</sub>, sendo 31,4 kg de CO<sub>2e</sub> advindos do betume.

Figura 52 - ACV - Reabilitação (normalização).



A Figura 52 corrobora os resultados anteriores, que mostra a radiação ionizante como principal categoria de impacto relativo nos serviços que usam betume (microrrevestimento, capeamento, reabilitação e reconstrução). Em vista disso, adotar medidas para redução ou substituição do ligante asfáltico, como o uso de biomateriais, podem ajudar a reduzir esse impacto.

De modo geral, os resultados da ACV mostraram que o aquecimento global é influenciado principalmente pelos materiais utilizados nos serviços de M&R, tendo uma contribuição menor do transporte, corroborando com os achados de Mallarapu *et al.* (2025). O transporte influencia de forma mais consistente a ecotoxicidade terrestre e a eutrofização de água doce.

Em relação às emissões de CO<sub>2e</sub>, observou-se que, quanto maior o consumo de materiais e a espessura das camadas, maior o impacto ambiental. Desse modo, verifica-se que selecionar materiais mais sustentáveis e adotar manutenções preventivas é ambientalmente vantajoso, pois serviços como remoção de borracha e microrrevestimento emitem menos kg de CO<sub>2e</sub>. Além disso, agir preventivamente pode estender a vida útil do pavimento, ajudando a evitar impactos ambientais elevados no futuro devido a necessidade de intervenções mais severas. A Tabela 38 apresenta um resumo dos resultados da ACV.

Tabela 38 - Resumo – ACV

Remoção de Borracha		
Categoria de Impacto	Valor / Destaque	Maior Contribuinte
Aquecimento Global (GWP)	0,362 kg CO <sub>2e</sub>	Diesel
Escassez de Recursos Fósseis	Elevado	Diesel
Eutrofização Marinha	Presente	Diesel
Toxicidade Humana Carcinogênica	Alta após normalização	Diesel
Ecotoxicidade Terrestre	Presente	Transporte
Consumo de Água	Presente	Eletricidade
Microrrevestimento		

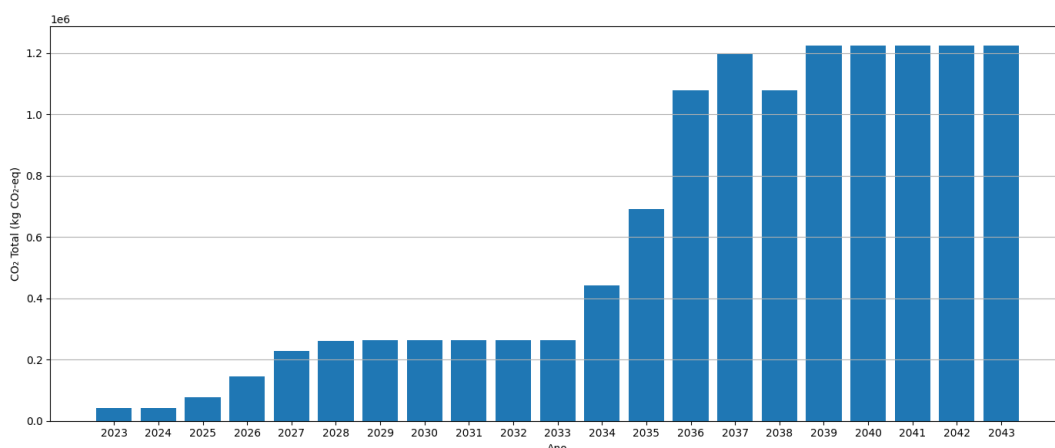
<b>Categoria de Impacto</b>	<b>Valor / Destaque</b>	<b>Maior Contribuinte</b>
Aquecimento Global (GWP)	1,85 kg CO <sub>2</sub> e	Betume + Cimento (fíler)
Radiação Ionizante	Elevado	Betume + Cimento (fíler)
Eutrofização Marinha	Relevante	Diesel
Escassez de Recursos Fósseis	Relevante	Diesel
Ecotoxicidade Terrestre	Elevado	Transporte
Eutrofização de Água Doce	Elevado	Polímero
<b>Recapeamento</b>		
<b>Categoria de Impacto</b>	<b>Valor / Destaque</b>	<b>Maior Contribuinte</b>
Aquecimento Global (GWP)	10,3 kg CO <sub>2</sub> e	Betume
Radiação Ionizante	Elevado	Betume
Ecotoxicidade Terrestre	Relevante	Transporte
Escassez de Recursos Fósseis	Relevante	Diesel
Eutrofização Marinha	Relevante	Diesel
Redução da Camada de Ozônio	Moderada	Agregados (brita + areia)
<b>Reforço</b>		
<b>Categoria de Impacto</b>	<b>Valor / Destaque</b>	<b>Maior Contribuinte</b>
Aquecimento Global (GWP)	20,3 kg CO <sub>2</sub> e	Betume
Radiação Ionizante	Elevado	Betume
Consumo de Água	Relevante	Betume
Uso da Terra	Relevante	Betume
Ecotoxicidade Terrestre	Elevada	Transporte
Escassez de Recursos Fósseis	Relevante	Diesel + Óleos combustíveis + Transporte
<b>Reconstrução</b>		
<b>Categoria de Impacto</b>	<b>Valor / Destaque</b>	<b>Maior Contribuinte</b>
Aquecimento Global (GWP)	107 kg CO <sub>2</sub> e	Betume
Radiação Ionizante	Elevado	Betume
Ecotoxicidade Terrestre	Elevada	Transporte
Eutrofização de Água Doce	Elevada	Transporte
Escassez de Recursos Fósseis	Relevante	Diesel
Eutrofização Marinha	Relevante	Diesel
Escassez de Recursos Minerais	Relevante	Agregados (areia + brita)
Depleção da Camada de Ozônio	Relevante	Agregados (areia + brita)
<b>Reabilitação</b>		
<b>Categoria de Impacto</b>	<b>Valor / Destaque</b>	<b>Maior Contribuinte</b>
Aquecimento Global (GWP)	67,9 kg CO <sub>2</sub> e	Betume
Radiação Ionizante	Elevado	Betume
Ecotoxicidade Terrestre	Elevada	Transporte
Escassez de Recursos Fósseis	Relevante	Diesel
Eutrofização Marinha	Relevante	Diesel
Eutrofização de Água Doce	Relevante	Óleos combustíveis

Depleção da Camada de Ozônio	Moderada	Agregados (brita + areia)
Contribuição Generalizada	Relevante em todas as categorias	Cimento (filer) + Polímero

#### 4.8 Resultados dos custos ambientais

Usando as emissões de CO<sub>2e</sub> obtidas na ACV, o preço do carbono de acordo com o Sistema de Comércio de Emissões da União Europeia (US\$ 61,03 por tonelada de CO<sub>2e</sub>), a área das seções da PPD e a árvore de decisão, foi possível determinar os custos ambientais e o VPL Ambiental. Foi usado o preço do carbono de acordo com o Sistema de Comércio de Emissões da União Europeia por ser o maior e mais consolidado mercado regulado de carbono do mundo. Foi utilizada a taxa de desconto de 8,5% a.a. e os horizontes de 20 anos, 30 anos e 40 anos. As Figuras 53 e 54 mostram o total de emissões e os custos para 20 anos.

Figura 53 - Total de CO<sub>2e</sub> por ano – 20 anos.

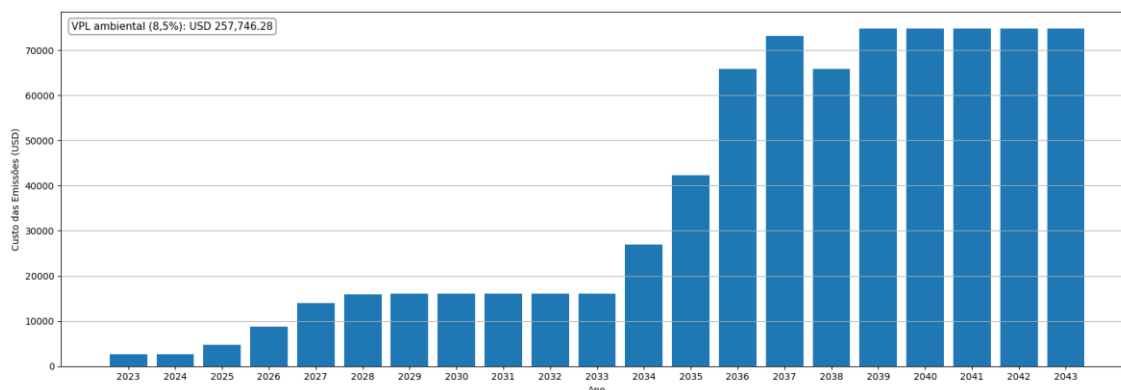


Observando a Figura 53, nota-se que as emissões totais de CO<sub>2e</sub> apresentam um padrão crescente ao longo dos anos. Isso acontece porque à medida que a PPD vai se aproximando do fim da sua vida útil, surge a necessidade de manutenções corretivas de forma recorrente, que emitem 8,45 vezes a mais que as manutenções preventivas (1,85 kg de CO<sub>2e</sub> por m<sup>2</sup> – preventiva; 10,3 kg de CO<sub>2e</sub> por m<sup>2</sup> – corretiva).

Entre 2023 e 2028 as emissões apresentam um padrão crescente, estabilizando-se em patamares baixos até 2033 (263.157,22 kg de CO<sub>2e</sub>). Nesse período a PPD necessita apenas de remoção de borracha e manutenção preventiva, que impactam menos o meio ambiente. Entre 2034 e 2037, as emissões passam a crescer de forma acentuada, atingindo o valor máximo em 2039 (1.225.370,4 kg de CO<sub>2e</sub>) e estabilizando-se até o final do período, em 2043. Isso denota

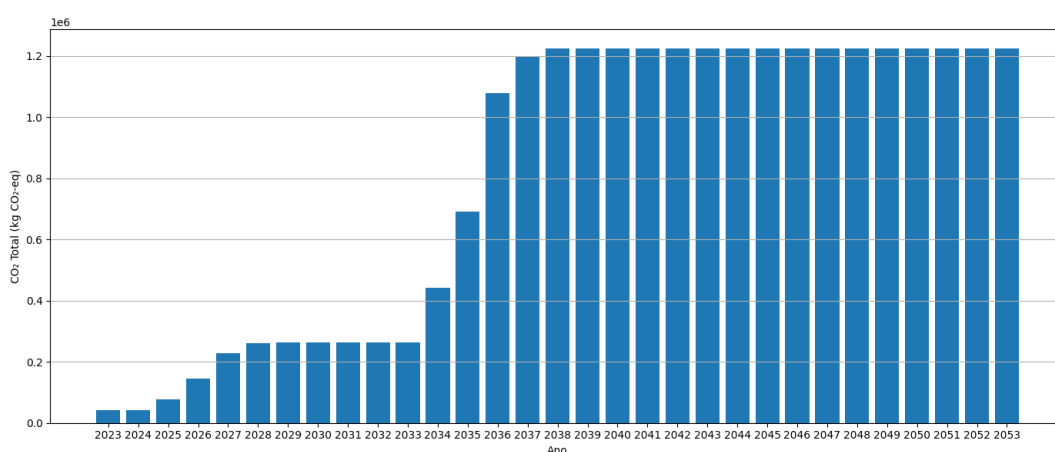
a passagem do ciclo de manutenção preventiva para um ciclo de manutenção corretiva, que é mais poluente.

Figura 54 - Custo das emissões de CO<sub>2e</sub> por ano – 20 anos.



A Figura 54 apresenta o mesmo padrão de comportamento da Figura 53. O VPL Ambiental foi de US\$ 207.746, 28. O custo das emissões até 2033, quando são aplicadas apenas manutenções preventivas e remoção de borracha é de US\$ 16.060,48. Em 2039, quando o custo das emissões atinge o seu máximo, o valor é de US\$ 74.784,36. Ou seja, o ciclo de manutenção corretiva é 4,66 vezes mais oneroso que o ciclo de manutenção preventiva. Investir em estratégias para mitigar os impactos ambientais e priorizar manutenções preventivas poderia diminuir os custos de M&R. A redução das emissões poderia ser transformada em custo monetário evitado ou créditos de carbono, gerando receitas para o operador do aeródromo. As Figuras 55 e 56 mostram os resultados para o período de 30 anos.

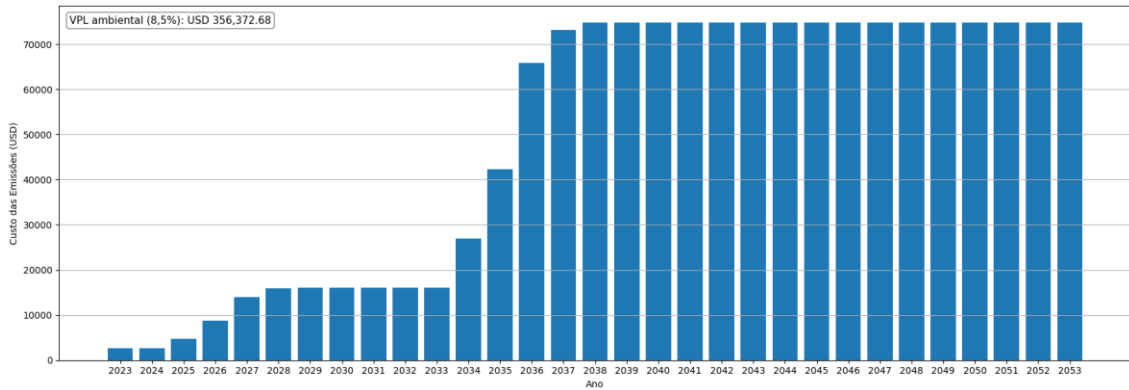
Figura 55 - Total de CO<sub>2e</sub> por ano – 30 anos.



Observando a Figura 55, nota-se o mesmo padrão visto no período de 20 anos, no qual as emissões de CO<sub>2e</sub> aumentam ao longo do ciclo vida do pavimento. As emissões são menores quando o pavimento demanda mais serviços de manutenção preventiva e remoção de borracha

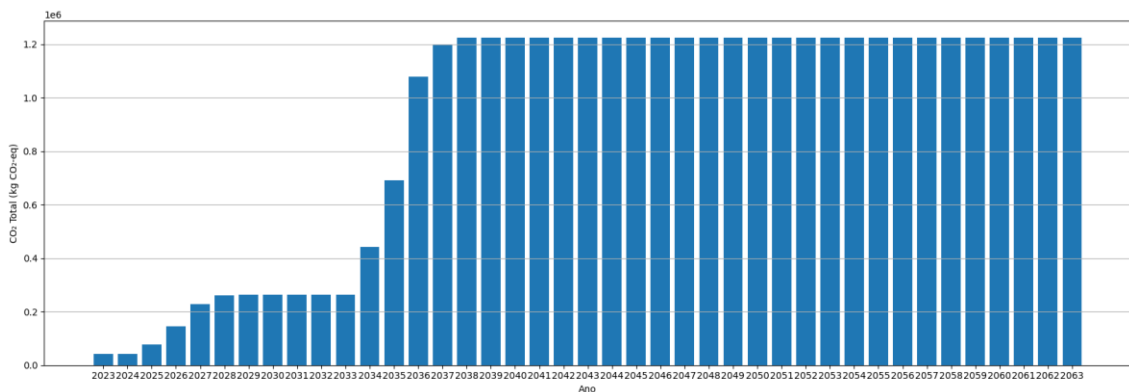
(até 2033) e estabilizam-se em valores elevados quando ocorrem manutenções corretivas recorrentes (2038 em diante).

Figura 56 - Custo das emissões de CO<sub>2e</sub> por ano – 30 anos.

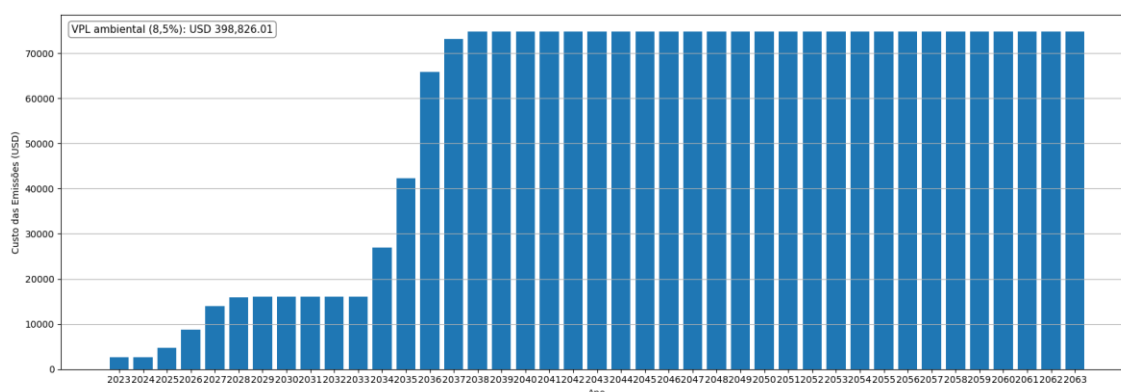


O custo das emissões (Figura 56) segue o mesmo padrão do total de emissões (Figura 55). O VPL Ambiental foi de US\$ 356.372,68, representando um aumento de 41,7% em relação ao período de 20 anos. Ou seja, a última década de análise adicionou US\$ 149 mil no VPL devido a necessidade recorrente de manutenção corretiva no final do período. Investir em estratégias de M&R de forma assertiva pode não só diminuir os custos de manutenção da PPD, mas também os impactos ambientais causados. As Figuras 57 e 58 apresentam os resultados para o horizonte de 40 anos.

Figura 57 - Total de CO<sub>2e</sub> por ano – 40 anos.



O total de emissões de CO<sub>2e</sub> para 40 anos (Figura 57) segue o mesmo padrão que o período de 30 anos (Figura 56). Isso ocorre porque ampliar o horizonte de análise em 10 anos adiciona mais manutenções corretivas recorrentes no final do período em função da deterioração contínua do pavimento.

Figura 58 - Custo das emissões de CO<sub>2e</sub> por ano – 40 anos.

O custo das emissões de CO<sub>2e</sub> (Figura 58) também segue o mesmo padrão do total de emissões (Figura 56). O VPL Ambiental foi de US\$ 398.826,01, representando um aumento de 11,9% em relação ao período de 30 anos. Assim, constata-se que a maior parte dos custos ambientais podem ser contabilizados no horizonte de 30 anos, uma vez que o efeito do desconto diminui os fluxos de caixa no final do período no horizonte de 40 anos.

De modo geral, verificou-se que os custos ambientais comportam-se da mesma forma que os custos de M&R. A inclusão desses custos na ACCV é vantajosa por permitir uma avaliação que não é estritamente econômica, mas que incorpora benefícios ambientais, como custos evitados, monetizados ao longo do ciclo de vida do pavimento. A Tabela 39 apresenta um resumo dos resultados desta seção. O Apêndice 6 apresenta o QRcode para acessar as planilhas com os resultados dos custos ambientais.

Tabela 39 - Resumo – Análise Ambiental.

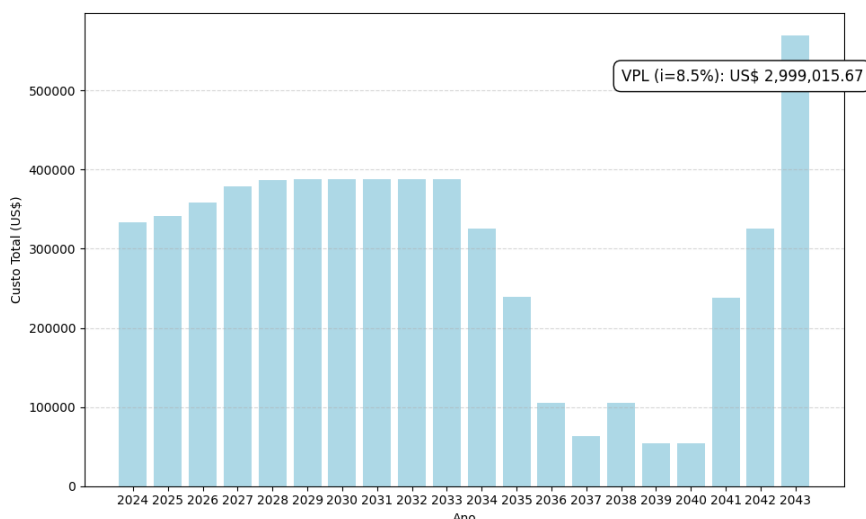
Horizonte	VPL Ambiental (US\$)	Emissões Totais (CO <sub>2e</sub> )	Comparação com o período anterior
<b>20 anos</b>	207.746,28	12.730.011,07	-
<b>30 anos</b>	356.372,68	25.130.787,26	+41,7% (VPL); +97,4% (Emissões)
<b>40 anos</b>	398.826,01	37.384.491,26	+11,9% (VPL); +48,7% (Emissões)

#### 4.9 Análise de Cenários de Manutenção e Reabilitação (M&R)

A ACCV realizada para os horizontes de 20 anos, 30 anos e 40 anos resultou em VPLs e custos de M&R elevados. Isso ocorreu devido a maior demanda por manutenção corretiva à medida que o pavimento se deteriora durante o seu ciclo de vida. Esse comportamento demonstra a necessidade de um gerenciamento efetivo para otimizar os recursos financeiros ao

longo do tempo. Nesse sentido, foi realizada uma modificação na árvore de decisão desta pesquisa para simular um cenário que prioriza manutenções preventivas ao invés de manutenções corretivas. A Figura 59 mostra o resultado desse cenário para o horizonte de 20 anos.

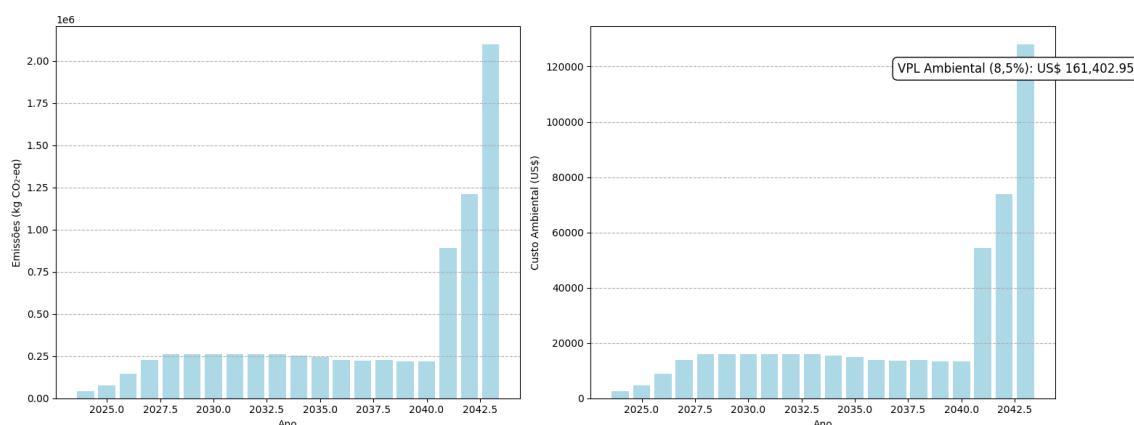
Figura 59 - Custos de M&R, priorizando manutenção preventiva - 20 anos.



A priorização de manutenção preventiva diminuiu o VPL Monetário de US\$ 4.169.793,50 para US\$ 2.999.015,67, ou seja, houve uma redução de aproximadamente US\$ 1,2 milhões, que correspondem a 28% a menos em VPL em 20 anos. Isso acontece porque os efeitos cumulativos favorecem a realização de manutenções preventivas, que possuem custos unitários baixos.

A Figura 59 mostra custos elevados no final do período (2041-2043). No entanto, esses custos afetam menos o VPL por estarem mais distantes no tempo (2043). De 2024 a 2027 ocorre um aumento gradual nos custos, com estabilização entre 2028 e 2033 em cerca de US\$ 388 mil, pois predominam estratégias como remoção de borracha e manutenções preventivas. De 2034 a 2040 observa-se uma queda dos valores de custo. Isso sugere que poucas intervenções foram programadas nessa fase, ou que a condição da PPD ainda não demandava tratamentos relevantes. De 2040 a 2043 há um novo aumento nos custos de manutenção, atingindo o valor máximo em 2043 (cerca de US\$ 521 mil). Esse valor corresponde à entrada de estratégias mais onerosas, como manutenção corretiva. A Figura 60 mostra os resultados da análise ambiental.

Figura 60 - Análise ambiental - 20 anos.



Observando-se a Figura 60, nota-se que entre 2024 e 2027 ocorre um aumento progressivo das emissões de CO<sub>2e</sub>, em valores moderados, e mantendo-se relativamente constantes entre 2028 e 2040 (em torno de 250 mil kg de CO<sub>2e</sub>). A partir de 2041, há um aumento nas emissões, atingindo o seu pico em 2043, quando o valor é superior a 2 milhões de kg CO<sub>2e</sub>. Esse comportamento indica que os anos finais contêm intervenções de maior intensidade, como manutenções corretivas.

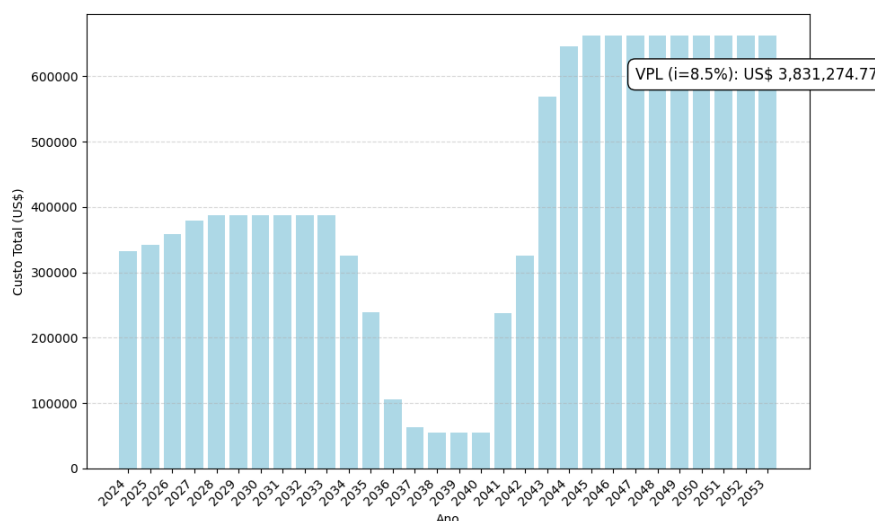
Em relação ao custo ambiental, o comportamento é o mesmo observado para as emissões, no qual o custo máximo é atingido em 2043, ultrapassando US\$ 120 mil. O valor VPL Ambiental de US\$ 161.402,95 indica que o custo ambiental acumulado descontado é elevado, mas ainda menor que os custos monetários de M&R. Embora o pico de emissões seja alto, ele ocorre no final do período de análise (2041-2043), reduzindo o peso do desconto.

Em relação ao cenário original de 20 anos, observa-se que priorizar manutenções preventivas reduz o VPL Ambiental em 22,3%. O total acumulado de emissões no cenário original foi de 12.730.011,07 kg de CO<sub>2e</sub>, enquanto no cenário com prioridade para manutenção preventiva esse valor caiu para 7.882.239,86 kg de CO<sub>2e</sub>, representando uma redução de 38,1%. Embora o cenário preventivo apresente um pico de emissões mais elevado nos anos finais (2041-2043) em comparação ao cenário original, o balanço ao longo de todo o horizonte de 20 anos resulta em emissões menores.

Assim, a priorização da manutenção preventiva mostra-se eficiente na redução dos custos do ciclo de vida do pavimento e dos impactos ambientais para um horizonte de 20 anos, corroborando os resultados de Babashamsi *et al.* (2022a). Ao intervir de forma antecipada, evita-se que a estrutura alcance níveis críticos de deterioração que exigem estratégias corretivas, reforços ou reconstruções, que são mais onerosas e poluentes.

Investir em ações preventivas não só garante níveis adequados de segurança e desempenho, como também otimiza o uso de recursos financeiros, oferecendo maior previsibilidade orçamentária e sustentabilidade às estratégias contidas em um Sistema de Gerência de Pavimentos Aeroportuários (SGPA). A Figura 61 mostra os resultados do cenário de priorização de manutenção preventiva para o período de 30 anos.

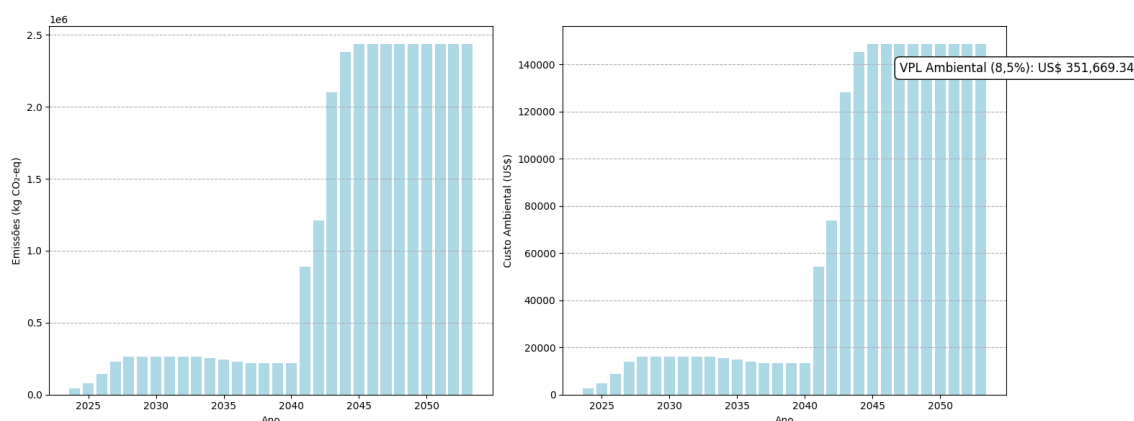
Figura 61 - Custos de M&R, priorizando manutenção preventiva - 30 anos.



Observando a Figura 61 percebe-se o mesmo comportamento visto na análise para 20 anos, na qual ocorre um aumento gradual dos custos entre 2024 e 2028 e estabilização entre 2029 e 2033, refletindo a adoção de estratégias como remoção de borracha e manutenção preventiva. A partir de 2041, há uma elevação progressiva e, após 2044, os custos se estabilizam em patamares elevados, superiores a US\$ 600 mil, devido à necessidade de manutenções corretivas.

O VPL Monetário calculado com taxa de desconto de 8,5% a.a. foi de US\$ 3.831.274,77 para o período de 30 anos, indicando que a ênfase em manutenções preventivas reduziu o VPL em aproximadamente 22,5% (antes era cerca de US\$ 4,9 milhões), mesmo com a ocorrência de custos elevados concentrados a partir da década de 2040. Esse resultado mostra que estratégias preventivas conseguem adiar e mitigar as intervenções mais caras, suavizando o fluxo de caixa e proporcionando maior eficiência econômica ao longo do ciclo de vida do pavimento. A Figura 62 mostra a análise ambiental para o horizonte de 30 anos.

Figura 62 - Análise ambiental - 30 anos.

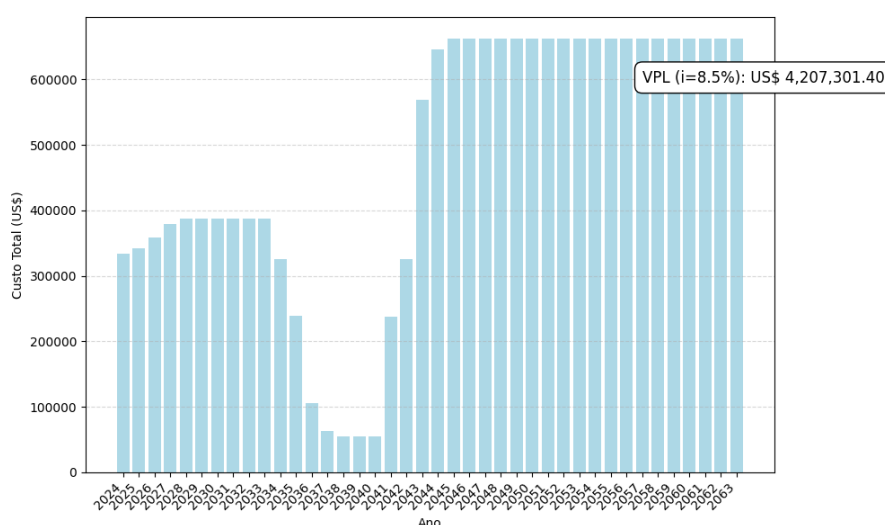


Na Figura 62, observa-se que as emissões anuais permanecem baixas entre 2024 e 2040, variando entre 50 mil e 250 mil kg de CO<sub>2e</sub>, valores característicos de estratégias como remoção de borracha e manutenções preventivas. A partir de 2041, ocorre um aumento progressivo das emissões, atingindo cerca de 900 mil kg de CO<sub>2e</sub>, indicando o início de manutenções corretivas. A partir de 2044, as emissões alcançam um patamar elevado e estável, permanecendo próximas de 2,5 milhões de kg de CO<sub>2e</sub> até o final do período, devido a necessidade recorrente de manutenção corretiva.

Esse comportamento tem implicações no custo ambiental. O VPL Ambiental de US\$ 351.669,34 no horizonte de 30 anos é maior que no horizonte de 20 anos, mas ainda inferior ao VPL Monetário. Entretanto, ao contrário do observado em 20 anos, a priorização de manutenção preventiva não reduziu o impacto ambiental total, pois o cenário original apresentou 25.130.787,26 kg de CO<sub>2e</sub> acumulados em 30 anos, enquanto o cenário preventivo aumentou esse valor para 32.204.473,20 kg de CO<sub>2e</sub>. Essa diferença de comportamento entre os horizontes temporal de 20 e 30 anos é explicada pela dinâmica conjunta de deterioração do pavimento, regras de decisão aplicadas e exigências acumuladas ao longo do ciclo de vida. Até aproximadamente 20 anos, as manutenções preventivas são capazes de manter o pavimento em níveis adequados de desempenho, postergando ações corretivas. No entanto, ao se estender o horizonte para 30 anos, mesmo com manutenção preventiva, o pavimento atinge níveis críticos de deterioração, o que aciona estratégias de maior intensidade, como manutenções corretivas recorrentes. Como as intervenções foram postergadas pela ação da manutenção preventiva, elas tendem a ocorrer de forma mais concentrada nos anos finais (2041-2053), envolvendo um número maior de seções simultaneamente. Isso gera picos acentuados de emissões nos últimos anos do ciclo (2041-2053).

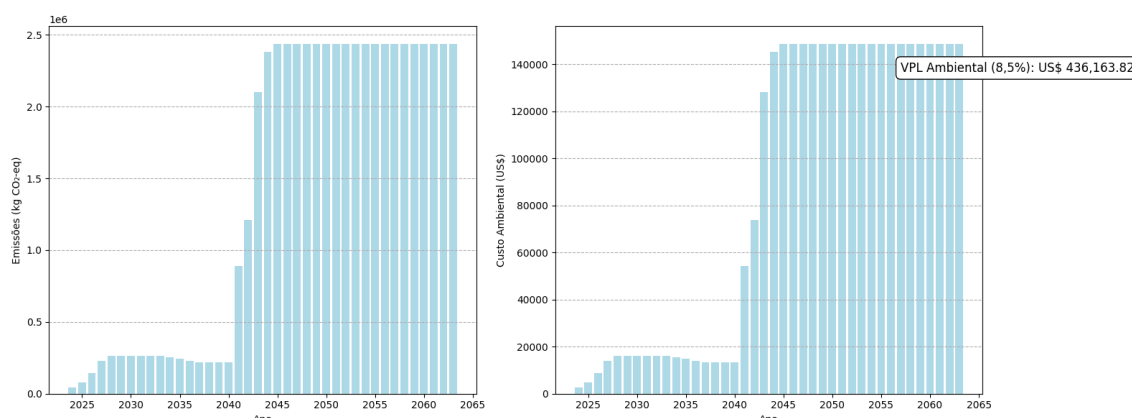
Assim, enquanto no curto prazo a manutenção preventiva reduz emissões e custos ambientais, no longo prazo ela pode apenas adiar intervenções corretivas inevitáveis. Isso demonstra que estratégias preventivas, embora economicamente vantajosas no curto prazo, no longo prazo exigem análises integradas que considerem toda a trajetória de deterioração e o momento em que intervenções corretivas se tornam inevitáveis para determinar sua eficiência ambiental. A Figura 63 apresenta o resultado do cenário de priorização de manutenção preventiva para o horizonte de 40 anos.

Figura 63 - Custos de M&R, priorizando manutenção preventiva - 40 anos.



Observando a Figura 63, nota-se o mesmo comportamento das análises anteriores, com custos crescentes no começo do período, estabilização, decréscimo e aumento acentuado a partir de 2040. Os custos se estabilizam a partir de 2045 em patamares elevados, acima de US\$ 600 mil. No cenário original de 40 anos, o VPL Monetário foi de aproximadamente US\$ 5,3 milhões, enquanto no cenário que prioriza manutenção preventiva o valor diminuiu para US\$ 4.207.301,40, representando uma redução de 20,5%. Essa diferença reforça a eficácia da priorização de manutenções preventivas em reduzir os custos de M&R ao longo do ciclo de vida, mesmo que os custos mais elevados ainda ocorram nas últimas décadas. A Figura 64 mostra a análise ambiental para o horizonte de 40 anos.

Figura 64 - Análise ambiental - 40 anos.



No cenário com horizonte de 40 anos (Figura 64), observa-se um comportamento semelhante aos anteriores (20 anos e 30 anos). O custo ambiental acompanha essa dinâmica, atingindo valores superiores a US\$ 140 mil no final do período. O VPL Ambiental foi de US\$ 436.163,82, superior aos valores observados nos horizontes de 20 e 30 anos, refletindo o aumento da intensidade e frequência das intervenções corretivas ao longo do tempo. Assim como visto para o cenário de 30 anos, a priorização de manutenção preventiva é eficaz para reduzir emissões no curto prazo, mas no longo prazo ela provoca a concentração de manutenções corretivas em vários anos consecutivos, resultando em emissões totais maiores. O total acumulado no cenário preventivo foi de 56.592.913,20 kg de CO<sub>2e</sub>, sendo 51% maior que no cenário original.

Esses resultados evidenciam que a manutenção preventiva é ambientalmente vantajosa apenas em horizontes curtos, período no qual consegue evitar ações corretivas mais intensivas. No entanto, em horizontes maiores, como 30 ou 40 anos, sua eficácia ambiental diminui. A estratégia preventiva posterga deteriorações, mas não impede que o pavimento atinja sua vida limite. Quando esse limite é atingido, as intervenções necessárias são mais extensas e concentradas, resultando em maior impacto ambiental acumulado. Assim, nos horizontes de 30 e 40 anos, priorizar manutenção preventiva não apenas deixa de reduzir emissões como agrava o impacto total ao longo do ciclo de vida, produzindo um passivo ambiental maior que o cenário original.

Em síntese, a análise dos cenários mostrou que a priorização de manutenções preventivas é mais vantajosa em horizontes curtos, reduzindo o VPL Monetário em cerca de 28% e as emissões totais de CO<sub>2e</sub> em 38,1% no horizonte de 20 anos. Essa vantagem também se reflete no VPL Ambiental, com queda de aproximadamente 22,3%. Contudo, à medida que o horizonte se amplia, a eficácia da estratégia diminui. Em 30 anos, intervenções corretivas

tornam-se inevitáveis, anulando a redução ambiental observada no curto prazo e em 40 anos há um aumento de cerca de 51% nas emissões acumuladas em comparação ao cenário original.

Assim, embora a manutenção preventiva apresente benefícios econômicos e ambientais no curto prazo, seu desempenho é menos favorável em horizontes mais longos (acima de 30 anos), quando os efeitos acumulados de grandes intervenções passam a dominar o ciclo de vida. Esses resultados reforçam que a escolha do horizonte de análise influencia na avaliação da eficiência das estratégias de M&R, destacando ganhos imediatos em prazos curtos e impactos mais amplos em prazos estendidos. A Tabela 40 apresenta um resumo dos resultados da análise de cenários considerando priorização de manutenção preventiva.

Tabela 40 - Resumo – Cenário de priorização de manutenção preventiva.

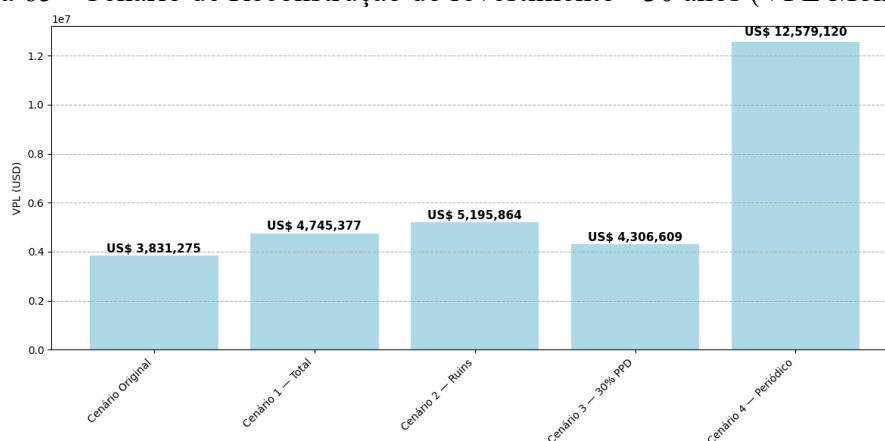
<b>Custos de M&amp;R</b>			
<b>Horizonte</b>	<b>VPL Monetário (US\$)</b>	<b>Comparação com o cenário sem priorizar manutenção preventiva</b>	
<b>20 anos</b>	2.999.015,67	- 28%	
<b>30 anos</b>	3.831.274,77	- 22,5%	
<b>40 anos</b>	4.207.301,40	- 20,5%	
<b>Análise Ambiental</b>			
<b>Horizonte</b>	<b>Emissões Totais (kg de CO<sub>2e</sub>)</b>	<b>VPL Ambiental (US\$)</b>	<b>Comparação com o cenário sem priorizar manutenção preventiva</b>
<b>20 anos</b>	7.882.239,86	161.402,95	-38,1% (Emissões); - 22,3% (VPL)
<b>30 anos</b>	32.204.473,20	351.669,34	+28,1% (Emissões); - 1,3% (VPL)
<b>40 anos</b>	56.592.913,20	436.163,82	+51% (Emissões); +9,4% (VPL)

Como, mesmo com a priorização de manutenções preventivas, os custos monetários nos horizontes de 30 e 40 anos permanecem elevados ao final do período e não apresentaram vantagens ambientais, optou-se por analisar cenários adicionais. Esses cenários contam com reconstrução do revestimento da PPD nos horizontes de 30 anos e 40 anos, a fim de avaliar o efeito de substituir as manutenções corretivas frequentes no fim do ciclo por reabilitações generalizadas, porém pontuais.

Assim, foram comparados os cenários sem reconstrução, mas priorizando manutenção preventiva, com uma reconstrução na extensão total da PPD em 2045, reconstrução apenas nas seções que possuem PCI Ruim ou Muito Ruim em 2041, reconstrução em 30% da PPD, nas seções que possuem maior área e reabilitações a cada 10 anos. A Reconstrução Total foi analisada em 2045, pois é quando os custos de manutenção atingem o valor máximo e se estabilizam até o fim do período e mais de 86% das seções são classificadas como Muito Ruim.

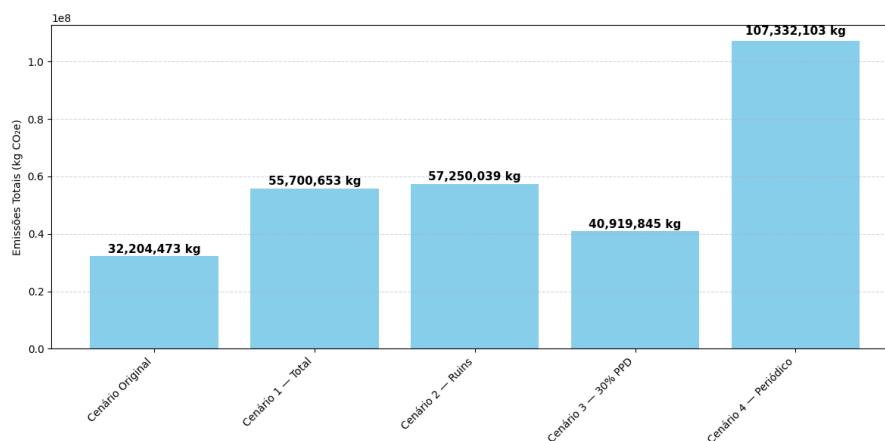
As reabilitações parciais foram analisadas em 2041 pois é quando os custos de manutenção começam a crescer de forma acentuada no final do período e a maior parte das seções são classificadas como Ruim. As Figuras 65 a 67 apresentam os resultados para o horizonte de 30 anos.

Figura 65 - Cenário de Reconstrução do revestimento - 30 anos (VPL Monetário).



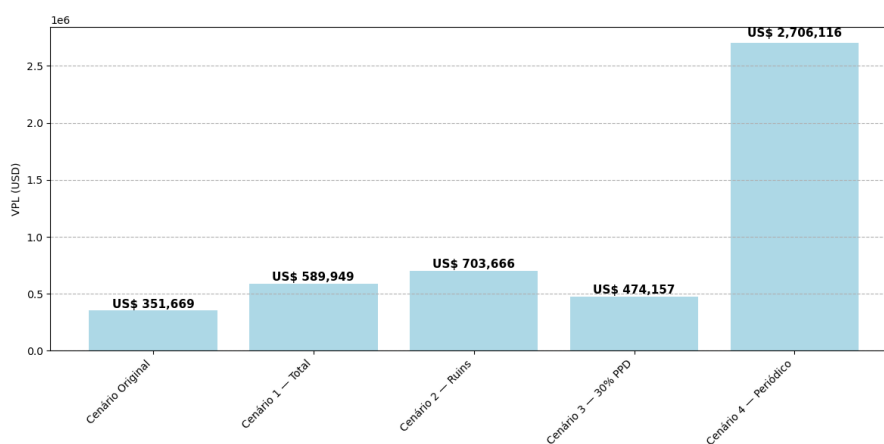
A Figura 65 mostra que o cenário original apresenta o menor VPL Monetário, indicando que, ao longo de 30 anos, as intervenções corretivas e preventivas previstas pela árvore de decisão ainda são menos onerosas do que reconstruções programadas. O Cenário 3 (reconstrução em 30% da PPD) apresenta custo relativamente baixo entre os cenários analisados, em relação ao cenário original, sugerindo que uma reabilitação parcial e bem direcionada (maiores áreas) pode ser eficiente economicamente. O Cenário 1 (reconstrução total em 2045) tem custo maior que o original, mas menor que cenários 2 e 4, indicando que uma única reconstrução total pode evitar múltiplas intervenções onerosas depois. O Cenário 4 é o mais oneroso, pois reconstruir o revestimento a cada 10 anos gera um VPL muito elevado, mostrando que essa prática de reconstrução periódica não é eficiente.

Figura 66 - Cenário de Reconstrução do revestimento - 30 anos (Emissões de CO<sub>2e</sub>).



A Figura 66 indica que o cenário original é o menos impactante ambientalmente, pois evita reconstruções, que são intervenções de alta emissão de CO<sub>2e</sub>. O cenário 3 oferece desempenho ambiental adequado em comparação aos cenários 1 e 2. O cenário 2 apresenta impacto ambiental elevado, porque reconstruir apenas áreas ruins muitas vezes gera várias obras fragmentadas, com elevada movimentação de materiais. O Cenário 4 tem o maior impacto ambiental porque reconstruções sequenciais produzem grandes volumes acumulados de CO<sub>2e</sub>.

Figura 67 - Cenário de Reconstrução do revestimento - 30 anos (VPL Ambiental).

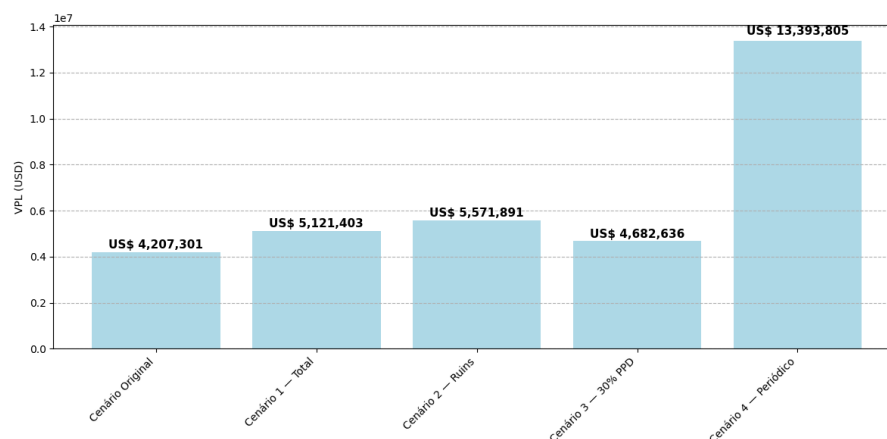


Observa-se, na Figura 67, que as emissões seguem um padrão semelhante aos custos ambientais e reforçam que as reconstruções totais ou recorrentes aumentam os impactos ambientais. O Cenário 3, com reconstrução parcial e focada nas maiores áreas, atinge um equilíbrio ambiental-econômico adequado.

No geral, o cenário original (sem reconstruções, mas priorizando manutenção preventiva) continua sendo o mais eficiente ambientalmente e o menos custoso monetariamente, em relação aos cenários de reconstrução do revestimento. O Cenário 3 se destaca como a melhor alternativa entre os cenários de reconstrução, pois apresenta custo relativamente baixo, emissões menores que os cenários 1 e 2, evita reconstruções totais caras e foca apenas nas áreas críticas de maior contribuição estrutural.

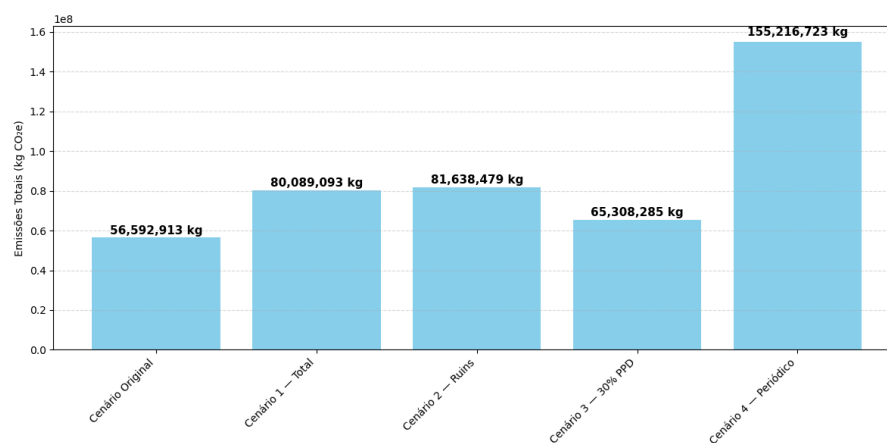
O Cenário 1 é vantajoso apenas quando há necessidade clara de renovação estrutural integral a médio prazo. O Cenário 2 tem o pior desempenho relativo entre 1, 2 e 3, mostrando que reparos fragmentados não são eficientes. O Cenário 4 é economicamente e ambientalmente inviável, mostrando que reconstruções periódicas não são eficientes econômica e ambientalmente. As Figuras 68 a 70 apresentam os resultados para o horizonte de 40 anos.

Figura 68 - Cenário de Reconstrução do revestimento - 40 anos (VPL Monetário).



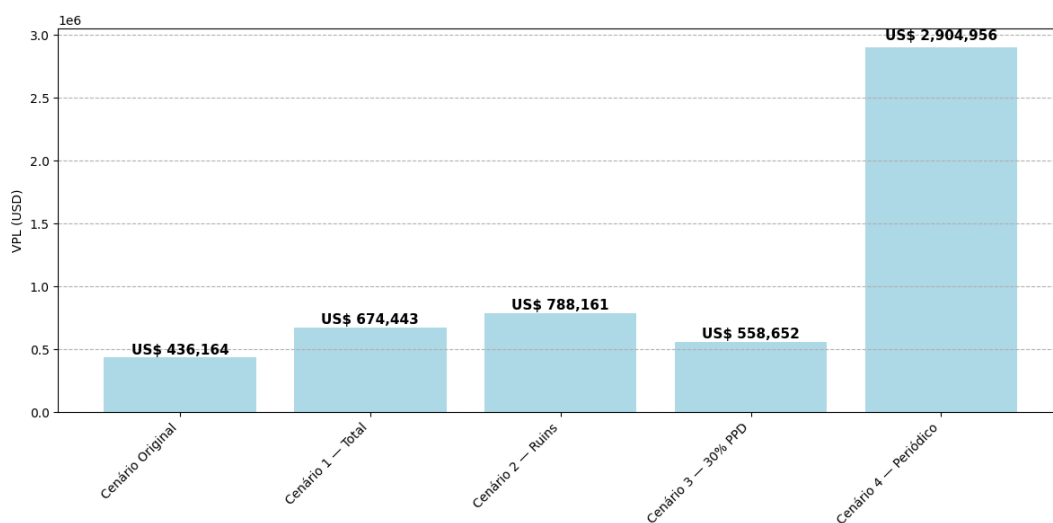
A Figura 68 mostra que para o horizonte de 40 anos, o cenário original (sem reconstrução, mas priorizando manutenção preventiva) continua apresentando o menor VPL Monetário. O Cenário 1 aumenta os custos em aproximadamente 22% em relação ao original, enquanto o Cenário 2 apresenta custo ainda maior, indicando que reconstruções parciais frequentes geram um acúmulo de intervenções onerosas. O Cenário 3 é o mais eficiente entre as alternativas de reconstrução, com VPL 11% superior ao cenário original. O Cenário 4 é o mais oneroso, sendo mais de três vezes superior ao VPL do cenário original.

Figura 69 - Cenário de Reconstrução do revestimento - 40 anos (Emissões de CO<sub>2e</sub>).



A Figura 69 indica que o cenário original é o mais eficiente ambientalmente para o horizonte de 40 anos. Reconstruções totais geram aumento de 40% a 45% nas emissões acumuladas (Cenários 1 e 2). O Cenário 3 é o mais equilibrado, aumentando as emissões em aproximadamente 15% em relação ao original. O Cenário 4 é o mais impactante, pois reconstrói frequentemente e gera quase 3 vezes mais emissões que o cenário original.

Figura 70 - Cenário de Reconstrução do revestimento - 40 anos (VPL Ambiental).



A partir da Figura 70, percebe-se que a tendência é semelhante à do VPL Monetário, na qual o cenário original é o mais sustentável. O Cenário 3 destaca-se como a melhor alternativa ambiental entre os cenários de reconstrução, com aumento moderado de impacto. O Cenário 4 é o pior em todos os critérios ambientais, ultrapassando o VPL Ambiental em quase 7 vezes em relação ao cenário original.

Tanto para os horizontes de 30 anos quanto de 40 anos, o cenário original (priorização de manutenção preventiva) é o mais eficiente economicamente e ambientalmente, pois distribui intervenções menores ao longo do tempo, evitando grandes operações de impacto elevado. O Cenário 3 (reconstrução em 30% da PPD) é o melhor entre os cenários de reconstrução, pois concilia custo e emissões e não exige reconstruções massivas, atuando somente nas áreas críticas e evitando grandes picos de impacto. Os Cenários 1 e 2 são viáveis, no entanto, são mais onerosos e poluentes, pois concentram reconstruções volumosas em um único momento, gerando picos de emissões e custos elevados por m<sup>2</sup>. O Cenário 4 é o menos eficiente, sendo justificável apenas em situações extremas de segurança operacional ou regulamentação rígida. A Tabela 41 apresenta um resumo para a análise de cenários envolvendo a reabilitação do revestimento da PPD.

Tabela 41 - Resumo da análise de cenários de reconstrução.

Cenário	Desempenho vs. Original (30 anos e 40 anos)
Original (sem reconstrução, mas priorizando manutenção preventiva)	Menor custo e menor impacto ambiental (referência)
Cenário 3 — Reconstrução em 30% (maiores áreas)	Melhor alternativa entre os cenários de reconstrução
Cenário 1 — Reconstrução total	Mais oneroso e mais emissões que original e 3
Cenário 2 — Reconstrução em seções Ruim ou Muito Ruim	Mais oneroso e mais emissões que original, 1 e 3
Cenário 4 — Reconstrução a cada 10 anos	Pior cenário geral

De modo geral, a análise de cenário mostrou que a priorização de manutenção preventiva é vantajosa do ponto de vista econômico no curto e no longo prazo. No entanto, do ponto de vista ambiental, priorizar manutenções preventivas gera redução de impactos ambientais apenas no curto prazo. No longo prazo, todas as análises realizadas (30 anos, 40 anos, reconstruções) resultaram em aumento dos impactos ambientais. Ainda assim, o cenário que prioriza manutenção preventiva é mais eficiente do que realizar reabilitações no revestimento da PPD. Isso enfatiza a importância de realizar uma análise econômica e ambiental de forma integrada para tomar decisões mais balanceadas na gerência de pavimentos aeroportuários. O Apêndice 7 contém o *QRcode* para acessar as planilhas com todos os resultados da análise de cenários.

#### 4.10 Custos Totais

Os custos totais foram calculados por meio da somatória dos VPL Monetário e Ambiental e estão apresentados nas Tabelas 42 e 43.

Tabela 42 - Custos Totais.

VPL	Árvore de decisão original			Manutenção preventiva		
	20 anos	30 anos	40 anos	20 anos	30 anos	40 anos
<b>VPL Monetário</b>	4.169.793,5 0	4.945.292,5 8	5.291.860,9 0	2.999.015,6 7	3.831.274,7 7	4.207.301,4 0
<b>VPL Ambiental</b>	207.746,28	356.372,68	398.826,01	161.402,95	351.669,34	436.163,82
<b>VPL Total</b>	4.377.539,7 8	5.301.665,2 6	5.690.686,9 1	3.160.418,6 2	4.182.944,1 1	4.643.465,2 2

A Tabela 42 evidencia que, em todos os horizontes de análise (20 anos, 30 anos e 40 anos), a priorização de manutenções preventivas reduziu o VPL Total, demonstrando a eficiência econômica desse tipo de intervenção ao longo do ciclo de vida do pavimento. No entanto, ao analisar o componente ambiental, observa-se um comportamento distinto, pois no

horizonte de 30 anos, o VPL Ambiental permaneceu semelhante ao cenário original (diminuição de 1,3%), enquanto no horizonte de 40 anos ele se tornou superior (aumento de 9,4%). Esse resultado indica que, embora a estratégia preventiva seja economicamente vantajosa, sua repetição ao longo de períodos mais longos pode intensificar as emissões acumuladas e, conseqüentemente, elevar o impacto ambiental.

Mesmo assim, como o VPL Ambiental continua sendo menor que o VPL Monetário em todos os horizontes, o VPL total (econômico + ambiental) ainda se mantém inferior no cenário que prioriza manutenções preventivas. Isso reforça que, apesar do aumento marginal dos impactos ambientais em longos prazos, a estratégia preventiva permanece mais favorável quando considerada sob a perspectiva integrada do custo do ciclo de vida e do ciclo de vida.

Tabela 43 - Custos Totais - Reconstrução.

VPL	Reconstrução				
	Original	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
30 anos					
<b>VPL Monetário</b>	3.831.274,77	4.745.377,00	5.195.864,00	4.306.609,00	12.579.120,00
<b>VPL Ambiental</b>	351.669,34	589.949,00	703.666,00	474.157,00	2.706.116,00
<b>VPL Total</b>	4.182.944,11	5.335.326,00	5.899.530,00	4.780.766,00	15.285.236,00
40 anos					
<b>VPL Monetário</b>	4.207.301,40	5.121.403,00	5.571.891,00	4.682.636,00	13.393.805,00
<b>VPL Ambiental</b>	436.163,82	674.443,00	788.161,00	558.652,00	2.904.956,00
<b>VPL Total</b>	4.643.465,22	5.795.846,00	6.360.052,00	5.241.288,00	16.298.761,00

A Tabela 43 reforça os resultados apresentados na Tabela 42, na qual o cenário original (que prioriza manutenções preventivas) permanece como o mais vantajoso tanto econômica quanto ambientalmente, para os dois horizontes de análise. Todos os cenários de reconstrução apresentaram valores superiores de VPL Monetário e Ambiental em relação ao original, refletindo o custo financeiro e o impacto ambiental elevados associados às intervenções de grande porte.

Esses resultados corroboram com Babashamsi *et al.* (2022a), que também realizaram uma análise integrada de ACCV e ACV. Os autores afirmam que o adiamento da manutenção preventiva em pavimentos aeroportuários pode aumentar os custos de M&R em 50%. Sendo assim, a manutenção preventiva é uma prática que deve ser adotada, principalmente, em países em desenvolvimento, nos quais a gerência de pavimentos de pavimentos ainda é um desafio, devido ao fato de a manutenção ser realizada apenas quando necessária.

#### 4.11 Análise de Custo de Oportunidade

Análise de Custo de Oportunidade permitiu calcular o Índice de Custo de Oportunidade (ICO), do ponto de vista monetário, ambiental e total. Considerou-se que, se o ICO for menor que 1, o cenário melhora o desempenho. Se o ICO for igual a 1, o cenário tem custo equivalente ao original e se o ICO for maior que 1, o cenário é pior do que o original. Os resultados estão apresentados na Tabela 44.

Tabela 44 - Índice de Custo de Oportunidade.

Horizonte	Cenário	ICO Monetário	ICO Ambiental	ICO Total
20	Preventiva	0,72	0,78	0,72
30	Preventiva	0,77	0,99	0,79
40	Preventiva	0,79	1,09	0,82
30	Reconstrução total	1,24	1,68	1,28
30	Reconstrução PCI ruim	1,36	2,00	1,41
30	Reconstrução 30% PPD	1,12	1,35	1,14
30	Reconstrução 10 em 10 anos	3,28	7,70	3,65
40	Reconstrução total	1,22	1,55	1,25
40	Reconstrução PCI ruim	1,32	1,81	1,37
40	Reconstrução 30% PPD	1,11	1,28	1,13
40	Reconstrução 10 em 10 anos	3,18	6,66	3,51

A Tabela 44 mostra que a priorização da manutenção preventiva é a estratégia mais vantajosa no horizonte de 20 anos, apresentando o menor ICO Total (0,72), o que indica uma redução dos custos em relação ao cenário original. Esses resultados corroboram com Ding, Sun e Chen (2013). Para 30 anos, a estratégia continua proporcionando economia monetária (ICO Total = 0,79), porém o ICO Ambiental é muito próximo de 1 (0,99), sugerindo impacto ambiental equivalente ao cenário base. No horizonte de 40 anos, embora a manutenção preventiva permaneça economicamente favorável (ICO Total = 0,79), não há vantagem ambiental, pois o ICO Ambiental supera 1 (1,09), evidenciando aumento dos impactos ambientais devido ao acúmulo de intervenções corretivas tardias.

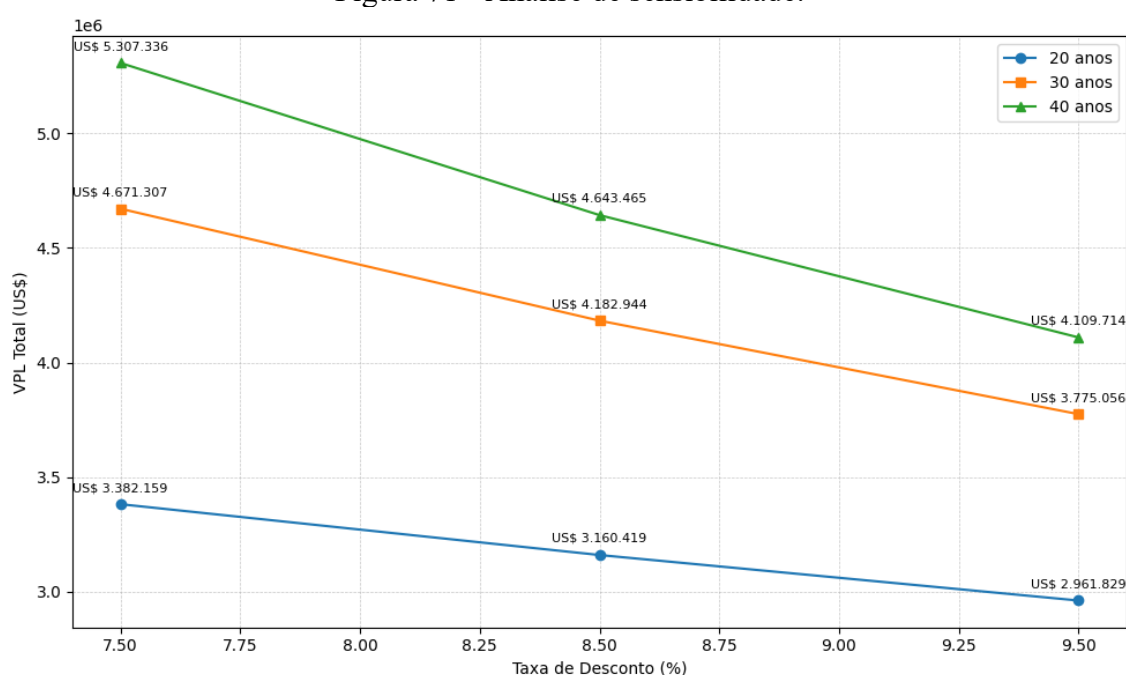
Nos cenários de reconstrução, o Cenário 3 obteve o melhor desempenho tanto para 30 anos quanto para 40 anos, com ICO Total de 1,14, indicando um custo 14% superior ao original, um aumento moderado considerando o tipo de intervenção. Por sua vez, o Cenário 4 apresentou o pior desempenho, com ICO Total entre 3,5 e 3,6, tornando-o cerca de 3,5 vezes mais oneroso do que o cenário original. Além disso, seu ICO Ambiental varia entre 7 e 8, caracterizando-o como o cenário com maior impacto ambiental entre todos os avaliados. Esses resultados

reforçam, mais uma vez, a importância de realizar manutenção preventiva em pavimentos aeroportuários, a fim de diminuir custos de M&R e garantir a segurança operacional da PPD. Vale ressaltar que as análises realizadas neste estudo consideraram apenas os custos diretos associados às atividades de manutenção e reabilitação (M&R), bem como os custos ambientais estimados a partir das emissões de carbono. Outros custos potencialmente relevantes, como aqueles decorrentes do fechamento da pista durante a execução das intervenções, que podem incluir impactos operacionais, atrasos ou reorganização das operações aeroportuárias, não foram incorporados à análise. Embora esses fatores possam influenciar os resultados econômicos, sua inclusão exigiria informações operacionais específicas que não estavam disponíveis no escopo deste estudo.

#### 4.12 Análise de Sensibilidade

Foi realizada uma análise de sensibilidade da taxa de desconto aplicada ao cálculo do VPL Total, utilizando o cenário de priorização de manutenção preventiva, por ter apresentado o melhor desempenho entre os cenários avaliados (menor ICO Total, variando de 0,72 a 0,79). Foram testadas três taxas de desconto com variações de 1% (7,5% a.a., 8,5% a.a. e 9,5% a.a.) de modo a avaliar a robustez dos resultados frente a variações nos parâmetros econômicos. Ou seja, a análise de sensibilidade teve o objetivo de avaliar o que acontece com o VPL ao variar a taxa de desconto. Os valores obtidos e suas implicações estão apresentados na Figura 71.

Figura 71 - Análise de sensibilidade.



A Figura 71 mostra que, à medida que a taxa de desconto aumenta, o VPL Total diminui, uma vez que taxas mais elevadas reduzem o valor presente dos custos futuros. Isso está de acordo com Ferreira e Santos (2012). No horizonte de 20 anos, os valores de VPL Total permanecem baixos e a variação entre as taxas é moderada. Isso ocorre porque a maior parte das intervenções ocorre nos primeiros anos do período, reduzindo o efeito do desconto sobre custos de longo prazo. Assim, o VPL Total mostra-se mais estável, indicando que, nesse horizonte, a taxa de desconto exerce um impacto menor sobre os resultados quando comparado aos horizontes mais longos.

No horizonte de 30 anos, observa-se um aumento dos custos totais em comparação ao horizonte de 20 anos, resultado da ocorrência de intervenções corretivas inevitáveis nos anos finais do período. Esse comportamento proporciona que o VPL Total apresente maior sensibilidade à taxa de desconto, já que uma parcela elevada dos custos está concentrada em períodos mais distantes no futuro. A diferença de aproximadamente US\$ 900 mil entre as taxas de 7,5% a.a. e 9,5% a.a. evidencia que o horizonte de 30 anos já captura a maior parte dos eventos de alto custo tardios, ampliando o impacto da variação da taxa de desconto sobre o valor presente.

O horizonte de 40 anos apresenta os maiores valores de VPL Total entre os três horizontes analisados, além da maior redução proporcional conforme a taxa de desconto aumenta. Esse comportamento é explicado pelo fato de que intervenções de maior porte, especialmente manutenções corretivas, tornam-se mais frequentes nesse período ampliado. Além disso, os custos ambientais acumulados crescem de forma mais acentuada após 2040, elevando o montante total a ser descontado.

Como esses eventos ocorrem nos anos finais do ciclo de vida, o efeito da taxa de desconto é intensificado, ou seja, os valores elevados posicionados no futuro sofrem maiores reduções quando descontados. Dessa forma, o horizonte de 40 anos revela-se o mais sensível às variações da taxa de desconto. Em síntese, quanto maior o horizonte de análise, maior o impacto da taxa de desconto nos resultados, pois a presença de custos elevados em períodos distantes amplifica a diferença entre as taxas avaliadas.

A avaliação de sensibilidade da taxa de desconto reforça a importância de considerar a incerteza econômica ao interpretar os resultados de ACCV. Ao testar diferentes taxas, confirma-se a robustez do cenário de manutenção preventiva em horizontes curtos e médios, ao mesmo tempo em que se compreende melhor o comportamento dos custos acumulados em horizontes longos. Dessa forma, a análise de sensibilidade não apenas valida os resultados obtidos, mas

também amplia a confiabilidade do processo decisório ao revelar como alterações de 1% na taxa de desconto podem modificar a percepção do custo total ao longo do ciclo de vida.

Os resultados apresentados nesta seção estão alinhados aos achados de Babashamsi *et al.* (2022a), que também realizaram uma análise de sensibilidade da taxa de desconto e observaram que o custo total tende a reduzir em mais de 10% a cada incremento de 1% nessa taxa. Contudo, a presente pesquisa avança em relação ao estudo citado ao incorporar, além do PCI, parâmetros estruturais e de resistência à derrapagem, proporcionando uma avaliação mais abrangente das condições do pavimento. Essa abordagem integrada amplia a robustez da análise econômica e contribui para uma compreensão mais consistente dos impactos das variáveis de entrada no processo de tomada de decisão em nível de gerenciamento aeroportuário.

#### **4.13 Disponibilização do método proposto**

O método integrado de Análise de Custo do Ciclo de Vida (ACCV) e Análise do Ciclo de Vida (ACV) desenvolvido neste estudo foi disponibilizado por meio de um *software* denominado LCCA – SGPA. Esse *software* é organizado em três módulos principais, apresentados como abas na interface gráfica. O primeiro módulo contempla os modelos de previsão de PCI, coeficiente de atrito e macrotextura, permitindo a estimativa do desempenho do pavimento ao longo do horizonte de análise. O segundo módulo calcula os custos de manutenção e reabilitação (M&R), os custos ambientais associados às emissões de CO<sub>2e</sub> e executa uma análise comparativa de cenários de M&R com base em árvores de decisão. Ou seja, o segundo módulo integra a ACCV com a ACV e análise de cenários de M&R. O terceiro módulo realiza a análise de sensibilidade do Valor Presente Líquido (VPL) em relação à taxa de desconto e calcula o Índice de Custo de Oportunidade (ICO) para subsidiar a tomada de decisão sob diferentes condições econômico-ambientais. A interface gráfica do *software* pode ser visualizada nas Figuras 72 a 74.

Figura 72 - Módulo 1 - Modelos de Previsão.

No primeiro módulo (Figura 72), o usuário deve inserir os arquivos contendo os dados históricos de PCI, coeficiente de atrito e macrotextura, além de definir o horizonte de previsão desejado. Para os modelos de coeficiente de atrito e macrotextura, o usuário pode optar por realizar a busca bayesiana de hiperparâmetros (*Bayesian Optimization*) marcando a caixa correspondente na interface gráfica. Caso não deseje executar novamente a otimização, basta desmarcar a opção e o *software* utilizará hiperparâmetros fixos previamente definidos. Os resultados deste módulo (valores previstos de PCI, coeficiente de atrito e macrotextura) podem ser exportados para uma pasta selecionada pelo usuário, permitindo o armazenamento e reutilização das previsões nos módulos subsequentes.

Figura 73 - Módulo 2 – ACCV e ACV.

No segundo módulo (Figura 73), o usuário deve inserir as planilhas contendo os valores previstos de PCI, de coeficiente de atrito e de macrotextura, gerados no módulo anterior, e selecionar a pasta para salvar os resultados. Além disso, deve-se informar o valor do CDF no

topo do subleito, obtido a partir da análise estrutural do pavimento. Para essa etapa, recomenda-se o uso do *software* FAARFIELD, amplamente empregado em análises aeroportuárias. Também é necessário fornecer a planilha com os custos unitários de M&R e a planilha contendo os resultados da ACV, incluindo as emissões de CO<sub>2e</sub> associadas a cada serviço de M&R. A ACV pode ser realizada em *softwares* especializados, como o SimaPro. O usuário deve, ainda, definir o ano inicial de análise, o horizonte de previsão, a taxa de desconto anual e os anos de aplicação das estratégias de M&R, no caso dos cenários que envolvem reconstrução programada. Esses parâmetros são utilizados para calcular os custos monetários, os custos ambientais, e para realizar a análise de cenários de M&R.

Figura 74 - Análise de sensibilidade de Índice de Custo/Benefício.

The screenshot shows the 'Simulador LCCA-SGPA' interface. The top navigation bar includes '1) Modelos', '2) Custos + Cenários', and '3) Sensibilidade / ICB'. The main section is titled 'Sensibilidade do VPL (árvore alternativa)'. It contains several input fields: 'Planilha de classificação/estratégia:', 'Planilha de custos unitários:', 'Planilha de LCA (CO<sub>2</sub> por estratégia):', and 'Pasta de saída (sensibilidade):', each with a 'Procurar...' button. Below these are 'Ano inicial:' (2024), 'Horizonte (anos):' (20), and 'Taxas de desconto (ex: 0.075,0.085,0.095):' (0.075,0.085,0.095). A 'Rodar análise de sensibilidade' button is centered. The bottom section is titled 'Índice de Custo-Benefício (ICB)' and includes 'Planilha de VPLs (Horizonte, Cenário, VPLs):' and 'Arquivo de saída (ICBs em Excel):', both with 'Procurar...' buttons. A 'Calcular ICBs' button is centered at the bottom.

No terceiro módulo (Figura 74), o usuário deve inserir a planilha contendo as estratégias de M&R gerada no módulo anterior, bem como a planilha de custos unitários e a planilha de ACV. Também deve ser selecionada uma pasta de saída para armazenamento dos resultados. Nesta etapa, o usuário define o ano inicial da análise, o horizonte de previsão e as taxas de desconto anual que deseja avaliar. Além disso, o módulo permite calcular o Índice de Custo de Oportunidade (ICO). Para isso, o usuário deve fornecer a planilha contendo os valores de VPL Total, obtida no módulo 2, e selecionar novamente a pasta onde os resultados do ICO serão salvos. Esse procedimento possibilita comparar cenários alternativos de M&R sob diferentes perspectivas econômico-ambientais.

Dessa forma, a integração dos resultados dos três módulos permite realizar uma análise conjunta de ACCV e ACV, avaliar diferentes cenários contendo distintas estratégias de M&R e incorporar parâmetros funcionais, estruturais e de resistência à derrapagem ao processo

decisório. Adicionalmente, as incertezas associadas aos parâmetros de entrada, como a taxa de desconto anual, podem ser exploradas por meio da análise de sensibilidade. Assim, o *software* constitui uma ferramenta ampla, de fácil utilização e potencialmente promissora para aplicação em um Sistema de Gerência de Pavimentos Aeroportuários (SGPA), apoiando o planejamento e a tomada de decisão das estratégias de M&R.

Ressalta-se que o método disponibilizado foi concebido de forma modular e estruturada, permitindo sua reprodução por outros pesquisadores e sua aplicação por operadores aeroportuários em diferentes contextos operacionais. A definição explícita das entradas, dos módulos de processamento, das regras de decisão e das saídas do sistema possibilita a adaptação do método a distintos aeroportos, desde que observadas as condições locais de dados e operação. Dessa forma, o método proposto apresenta caráter reproduzível e transferível, ampliando seu potencial de uso como ferramenta de apoio à tomada de decisão na gerência de pavimentos aeroportuários.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho teve como objetivo desenvolver um método integrado de Análise de Custo do Ciclo de Vida (ACCV) e Análise do Ciclo de Vida (ACV), incorporando as condições funcionais, estruturais e de resistência à derrapagem de pistas de pouso e decolagem (PPD), como uma estrutura de apoio à decisão para estratégias de manutenção e reabilitação (M&R). A metodologia desenvolvida integrou a avaliação funcional, a avaliação da resistência à derrapagem, a previsão de desempenho, a análise estrutural, a definição de estratégias de M&R por meio árvore de decisão, a análise econômica e ambiental e cálculo do Valor Presente Líquido (VPL), permitindo uma visão abrangente e estratégica da gerência de pavimentos aeroportuários.

### 5.1 Principais Conclusões

A partir dos resultados analisados e suas evidências, foi possível concluir que:

- a) É importante avaliar periodicamente os parâmetros de resistência à derrapagem (coeficiente de atrito e macrotextura) e a condição funcional geral da PPD, por meio do *Pavement Condition Index* (PCI), para subsidiar decisões de M&R. A segurança operacional de pousos e decolagens depende da manutenção adequada desses parâmetros, justificando a necessidade de monitoramento contínuo e de intervenções planejadas;
- b) O coeficiente de atrito apresentou comportamento cíclico, refletindo degradação progressiva devido ao polimento dos agregados e a manutenção periódica por remoção do acúmulo de borracha. Por sua vez, a macrotextura apresentou tendência de crescimento gradual, indicando abertura progressiva da textura do revestimento. As relações entre PCI, coeficiente de atrito e macrotextura mostraram-se, por vezes, diretas ou inversas, indicando que desgaste e envelhecimento podem aumentar a macrotextura (textura mais aberta) e reduzir o PCI, ou reduzir simultaneamente o coeficiente de atrito (polimento de agregados) e o PCI. Esses padrões refletem comportamentos físicos distintos da deterioração funcional;
- c) A avaliação estrutural mostrou que a PPD pode ser considerada estruturalmente superdimensionada. A restrição principal para a segurança operacional não é estrutural, mas funcional. Isso implica que estratégias de M&R devem priorizar intervenções funcionais (preventivas e corretivas), em vez de intervenções estruturais. Uma revisão

- do projeto estrutural é recomendada em futuras intervenções, com o objetivo de otimizar os custos de construção;
- d) O modelo de previsão do PCI indicou deterioração contínua ao longo dos anos, caso nenhuma reabilitação fosse realizada. Os modelos de previsão baseados em redes neurais recorrentes apresentaram desempenho robusto, com  $R^2$  elevado e erros residuais baixos. No entanto, o desempenho do modelo de macrotextura diminui quando se atinge valores elevados ou distantes do centro da distribuição, o que é esperado em séries irregulares e banco de dados menores. Ainda assim, a modelagem mostrou-se adequada para projeções de coeficiente de atrito e de macrotextura;
  - e) A ACCV demonstrou que os custos de manutenção aumentam com o tempo devido ao surgimento inevitável de manutenções corretivas, mais onerosas. A estratégia de manutenção preventiva mostrou-se mais econômica, reduzindo o VPL Monetário em relação ao cenário original (sem priorização de manutenção preventiva). Reforça-se, assim, a importância de uma abordagem proativa de manutenção, pois investir em intervenções preventivas periódicas reduz os custos futuros e prolonga a vida útil do pavimento;
  - f) A ACV permitiu quantificar emissões ambientais associadas a cada tipo de M&R. A manutenção preventiva gera menos emissões que a manutenção corretiva ou o reforço. Em 20 anos, priorizar ações preventivas reduziu emissões totais e o VPL Ambiental; nos horizontes de 30 anos e 40 anos, entretanto, o impacto ambiental total não diminuiu, pois as manutenções corretivas foram apenas postergadas. Isso evidencia que a manutenção preventiva é ambientalmente mais vantajosa no curto prazo, mas seus benefícios tendem a diminuir à medida que o ciclo de vida aumenta;
  - g) Embora a ampliação do horizonte de análise proporcione uma visão mais completa do ciclo de vida do pavimento, um período de 30 anos mostra-se adequado para capturar os principais custos e impactos associados às estratégias de M&R, oferecendo subsídios para o planejamento de longo prazo nos Sistemas de Gerência de Pavimentos Aeroportuários (SGPA). Além disso, as evidências reforçam a influência do horizonte de análise na avaliação de eficiência das estratégias de M&R, retratando ganhos de curto prazo, mas impactos mais amplos em prazos estendidos;
  - h) A soma do VPL Monetário e Ambiental mostrou que a prioridade de manutenção preventiva apresenta o menor VPL Total em todos os horizontes (20 anos, 30 anos e 40 anos). Quanto maior o horizonte de análise, maiores os custos acumulados e maior o peso das intervenções corretivas tardias. Mesmo com aumento do impacto ambiental

em horizontes de médio e longo prazo (acima de 30 anos), o VPL Total permanece inferior ao cenário original. Além disso, o Índice de Custo de Oportunidade foi menor para o cenário de manutenção preventiva, mostrando que essa é a estratégia de maior benefício e menor custo. Portanto, o estudo confirma que a melhor estratégia global é investir em manutenção preventiva, especialmente considerando horizontes de até 30 anos;

- i) A análise de sensibilidade da taxa de desconto evidenciou que o aumento da taxa provoca a diminuição do VPL Total, por reduzir o peso dos custos futuros. No horizonte de 20 anos, a sensibilidade é baixa, pois o efeito do desconto é moderado. No horizonte de 30 anos, a sensibilidade é moderada, e em 40 anos, o VPL Total é o mais sensível, pois os maiores custos ocorrem tarde no ciclo de vida. Essa análise reforça a necessidade de considerar incertezas econômico-financeiras no processo decisório, especialmente em horizontes longos e economias instáveis;
- j) A robustez do método integrado proposto, avaliada por meio da análise de sensibilidade da taxa de desconto anual, indicou que, embora variações nesse parâmetro influenciem os valores absolutos do VPL, as estratégias de M&R recomendadas mantêm-se consistentes nos cenários analisados. Isso reforça sua confiabilidade como ferramenta de apoio à tomada de decisão na gerência de pavimentos aeroportuários.

A integração de dados reais, modelagem preditiva, avaliação estrutural, árvore de decisão, ACCV e ACV, no *software* LCCA – SGPA, permitiu construir uma metodologia ampla, adaptável e aplicável para SGPA. A ACCV integrada com a ACV mostrou-se uma ferramenta promissora para otimizar recursos, apoiar a tomada de decisão e garantir a segurança operacional de pousos e decolagens com menor impacto econômico e ambiental. O método proposto, com o desenvolvimento do *software* LCCA – SGPA, apesar de suas limitações, contribui para o avanço da gerência de pavimentos aeroportuários no Brasil, oferecendo uma abordagem sistemática, científica e sustentável que pode ser ampliada para outras pistas, pátios, aeroportos e sistemas de transporte.

## 5.2 Limitações da pesquisa

Embora este estudo tenha permitido alcançar conclusões importantes, algumas limitações devem ser reconhecidas. A ACCV desenvolvida considerou apenas os custos diretos e os custos ambientais das ações de M&R, não incorporando custos de construção, valor residual do pavimento e custos indiretos. A ausência destes últimos, particularmente os custos

indiretos, pode alterar os resultados finais, dado seu impacto potencial sobre a economia operacional e o nível de serviço da infraestrutura aeroportuária. Além disso, a obtenção dos custos unitários foi realizada com base em dados rodoviários (SICRO/DNIT), uma vez que não existe um sistema de custos específicos para aeroportos no Brasil.

Outra limitação deste estudo está associada aos bancos de dados disponíveis, especialmente ao tamanho reduzido dos conjuntos de dados de macrotextura e de PCI. O desempenho do modelo de previsão de macrotextura poderia ser aprimorado com a ampliação da base de dados, permitindo uma melhor representação da variabilidade temporal e operacional do pavimento. De forma semelhante, o modelo de previsão do PCI poderia apresentar maior robustez caso fossem adotadas abordagens alternativas à taxa de deterioração, o que seria viável com a disponibilidade de um banco de dados mais extenso e diversificado.

Ademais, a abordagem adotada na ACCV é essencialmente determinística. Embora tenha sido realizada uma análise de sensibilidade, os resultados evidenciam a importância de incorporar a variabilidade dos dados de entrada, sobretudo no que se refere à taxa de desconto anual. Por fim, a metodologia foi aplicada a uma única PPD, ainda que possa ser replicada para outros aeroportos.

### **5.3 Sugestão para trabalhos futuros**

Diante das limitações identificadas neste estudo, diversas oportunidades de pesquisa futura podem ser exploradas. Uma delas refere-se à adoção de abordagens híbridas para os modelos de previsão de desempenho, como a combinação de redes neurais recorrentes com componentes probabilísticos, o que pode contribuir para previsões mais robustas, especialmente em horizontes de longo prazo. Além disso, a ampliação do banco de dados de macrotextura tende a aprimorar o desempenho dos modelos preditivos, ao permitir uma melhor representação da variabilidade do pavimento. Outro desenvolvimento futuro igualmente relevante consiste na formulação de modelos mais robustos para a previsão do PCI, viabilizados pela disponibilidade de bases de dados mais extensas e diversificadas, possibilitando a adoção de abordagens alternativas à adotada neste estudo (taxas de deterioração).

Outra recomendação para trabalho futuro é a incorporação de incertezas nos processos de ACCV e ACV. A análise de sensibilidade desta pesquisa demonstrou que a taxa de desconto anual exerce influência sobre os resultados. Assim, estudos futuros poderiam empregar simulações de Monte Carlo, análise probabilística de riscos ou curvas de confiabilidade associadas às estratégias de M&R, aumentando a robustez e a confiabilidade das projeções. No

que se refere a ACV, a incorporação de incertezas deve se concentrar principalmente na variação do preço do carbono.

No campo das alternativas de M&R, também é pertinente investigar estratégias ambientalmente otimizadas, como o uso de ligantes reciclados ou modificados com borracha, misturas com agregado reciclado, ou tecnologias de menor impacto. Essas alternativas podem alterar os resultados econômicos e ambientais, oferecendo oportunidades de reduzir emissões e custos sem comprometer o desempenho funcional ou estrutural. Além disso, recomenda-se expandir a aplicação do método para aeroportos regionais e outros com diferentes condições climáticas no Brasil, permitindo o desenvolvimento de modelos mais generalizáveis e representativos da realidade operacional do país.

Por fim, sugere-se que estudos futuros incluam custos indiretos associados às intervenções de M&R, como atrasos operacionais, redução temporária da capacidade operacional das pistas e custos sociais decorrentes de emissões. A inclusão desses elementos contribuirá para uma ACCV mais abrangente e alinhada às práticas internacionais de planejamento e gerência de pavimentos aeroportuários, fortalecendo sua capacidade de apoiar decisões estratégicas de longo prazo.

## REFERÊNCIAS

- AAPTP (2011). Airfield Asphalt Pavement Technology Program. Life cycle cost analysis for airport pavements. Final Report AAPTP 06-06, 2011.
- ABNT (2009a). ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR ISO 14040:2009 — Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Princípios e estrutura*. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. (Versão corrigida em 2014).
- ABNT (2009b). ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR ISO 14044:2009 — Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e diretrizes*. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. (Versão corrigida em 2014).
- ALALOUL, W.S.; ALTAF, M.; MUSARAT, M.A.; FAISAL JAVED, F.; MOSAVI, A (2021). Systematic Review of Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost Analysis for Pavement and a Case Study. *Sustainability* 2021, 13, 4377. <https://doi.org/10.3390/su13084377>.
- ALMEIDA, A. F. M.; OLIVEIRA, F. H. L. de. (2022). Análise do Pavement Condition Index aeroportuário com uso de estatística espacial. *Anais do Air Transportation Symposium (SITRAER)*. São José dos Campos, São Paulo, 2022.
- ALIHA, M.R.M.; KARIMI, H. R.; KHEDRI, E.; SEPEHR, V. (2024). Abdipour, Pegah Jafari Haghghatpour, Rehabilitation and reinforcement of cracked pavements using crack sealers and composite patches, *Heliyon*, Volume 10, Issue 19, 2024, e38145, ISSN 2405-8440, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38145>.
- ANAC (2024a). Agência Nacional de Aviação Civil. Relatório Anual de Segurança Operacional - RASO 2024. Disponível em: [https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/seguranca-operacional/informacoes-de-seguranca-operacional/copy3\\_of\\_RASO\\_2024\\_vFinal.pdf](https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/seguranca-operacional/informacoes-de-seguranca-operacional/copy3_of_RASO_2024_vFinal.pdf). Acesso em: 06 de outubro de 2025.
- ANAC (2024b). Agência Nacional de Aviação Civil. Histórico de voo. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/dados-e-estatisticas/historico-de-voos>. Acesso em: 03 de outubro de 2024.
- ANAC (2023a). Agência Nacional de Aviação Civil. Regulamento Brasileiro da Aviação Civil RBAC N° 153 Emenda N° 07. Aeródromos - Operação, Manutenção e Resposta à Emergência. Brasília, DF, 2023.
- ANAC (2023b) Agência Nacional de Aviação Civil. Instrução Suplementar - IS. IS N°153.205-001. Revisão C. Monitoramento da irregularidade longitudinal, atrito e macrot textura do pavimento da pista pouso e decolagem. Brasília, DF, 2023.
- ANAC (2022). Agência Nacional de Aviação Civil. Manual de cálculo de PCR de pavimentos aeroportuários. Brasília, DF, 2022.
- ANAC (2021). Análise Qualitativa dos Relatórios Finais das ocorrências com aeronaves de matrícula brasileira nos últimos 10 anos (2010-2019) classificadas como Excursão de Pista (RE). [S. 1.]: Agência Nacional de Aviação Civil, 2021. Disponível em: [https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/seguranca-operacional/relatorios-de-analises-deocorrencias/Relatorio\\_RE\\_VersaoFinal.pdf](https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/seguranca-operacional/relatorios-de-analises-deocorrencias/Relatorio_RE_VersaoFinal.pdf) . Acesso em: 24 maio 2022.
- ANAC (2020a). Agência Nacional de Aviação Civil. Instrução Suplementar - IS N° 153.203-001 Revisão A. Avaliação da condição funcional do pavimento. Brasília, DF: ANAC, 2020.

ANAC (2020b). Agência Nacional de Aviação Civil. Manual de cálculo de PCN de pavimentos aeroportuários usando o COMFAA 3.0. Brasília, DF: ANAC, 2020.

ANAC, (2017). Agência Nacional de Aviação Civil. Manual de Sistema de Gerenciamento de Pavimentos Aeroportuários – SGPA. 1º Ed. Brasília, DF, 2017.

ANSARILARI, Z., & GOLROO, A. (2019). Integrated airport pavement management using a hybrid approach of Markov Chain and supervised multi-objective genetic algorithms. *International Journal of Pavement Engineering*, 21(14), 1864–1873. <https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1571208>.

ANTHONISSEN, J., BRAET, J., & VAN DEN BERGH, W. (2015). Life cycle assessment of bituminous pavements produced at various temperatures in the Belgium context. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 41, 306-317. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.10.011>

APS, M. (2006). Classificação da Aderência Pneu-Pavimento pelo Índice Combinado IFI – International Friction Index para Revestimentos Asfálticos. Tese de Doutorado, Escola Politécnica – USP, São Paulo, 2006. <https://doi.org/10.11606/T.3.2006.tde-11122006-144825>.

ASSIS, R. K. M.; DURÁN, J. B. C.; CUNHA, A. L.; PITOMBO, C. S.; FERNANDES JR., J. L. (2016). Uso de Redes Neurais Artificiais para o Desenvolvimento de Modelos de Previsão da Condição de Pavimentos de Aeroportos. *Anais do 7º Congresso Luso Brasileiro para o Planejamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável. Contrastes, Contradições e Complexidades*. Maceió, Alagoas, 2016.

ASTM (2020). ASTM D5340-20: Standard Test Method for Airport Pavement Condition Index Surveys. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020.

BABASHAMSI, P.; KHAHRO, S.H.; OMAR, H.A.; AL-SABAEI, A.M.; MEMON, A.M.; MILAD, A.; KHAN, M.I.; SUTANTO, M.H.; YUSOFF, N.I.M (2022a). Perspective of Life-Cycle Cost Analysis and Risk Assessment for Airport Pavement in Delaying Preventive Maintenance. *Sustainability* 2022, 14, 2905. <https://doi.org/10.3390/su14052905>.

BABASHAMSI, P.; KHAHRO, S.H.; OMAR, H.A.; ROSYIDI, S.A.P.; M AL-SABAEI, A.; MILAD, A.; BILEMA, M.; SUTANTO, M.H.; YUSOFF, N.I.M (2022b). A Comparative Study of Probabilistic and Deterministic Methods for the Direct and Indirect Costs in Life-Cycle Cost Analysis for Airport Pavements. *Sustainability* 2022, 14, 3819. <https://doi.org/10.3390/su14073819>.

BABASHAMSI, P.; MD YUSOFF, N. I.; CEYLAN, H.; MD NOR, N. G.; JENATABADI, H. S. (2016). Sustainable Development Factors in Pavement Life-Cycle: Highway/Airport. *Review. Sustainability* 2016, 8, 248; doi:10.3390/su8030248.

BAIR, T.; DECKER, C. S.; BETHU, V. S. (2021). Customized LCCA, a Practical Guide and Critical Tool: Case Study at TUS Airport. In: *Airfield and Highway Pavements 2021*.

BARCELOS, B. T. (2025). Avaliação da condição funcional de pavimento aeroportuário segundo a metodologia do Índice de Condição do Pavimento (PCI): estudo de caso no Aeroporto de Joinville/SC. 2025. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências Mecânicas) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, Joinville, 2025.

BARUA, L., & ZOU, B. (2022). Planning maintenance and rehabilitation activities for airport pavements: A combined supervised machine learning and reinforcement learning approach.

International Journal of Transportation Science and Technology, 11(2), 423-435. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2021.05.006>.

BARUA, L., ZOU, B., NORUZOLIAEE, M., & DERRIBLE, S. (2020). A gradient boosting approach to understanding airport runway and taxiway pavement deterioration. *International Journal of Pavement Engineering*, 22(13), 1673–1687. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1714616>.

BARUA, L.; ZOU, B. (2022). Planning maintenance and rehabilitation activities for airport pavements: A combined supervised machine learning and reinforcement learning approach. *International Journal of Transportation Science and Technology*, [S.l.], v. 11, p. 423-435, 2022.

BALLINI, R. (2000). Análise de Previsão de Vazões Utilizando Modelos de Séries Temporais, Redes Neurais e Redes Neurais Nebulosas. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2000. 183f.

BENEDETTO, A. (2002). A decision support system for the safety of airport runways: The case of heavy rainstorms. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 36(8), 665-682. [https://doi.org/10.1016/S0965-8564\(01\)00029-5](https://doi.org/10.1016/S0965-8564(01)00029-5).

BIANCARDO, S. A., ABBONDATI, F., RUSSO, F., & VEROPALUMBO, R. (2020). A Broad-Based Decision-Making Procedure for Runway Friction Decay Analysis in Maintenance Operations. *Sustainability*, 12(9), 3516. <https://doi.org/10.3390/su12093516>.

BRASIL (2024). Preço de distribuição de Produtos Asfálticos da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/precos-de-distribuicao-de-produtos-asfalticos>. Acesso em: 03 de outubro de 2024.

BRASIL (2020). Taxa social de desconto para infraestrutura: atualização pós consulta pública. Nota Técnica. Ministério da Economia. Secretaria de Desenvolvimento da Infraestrutura, Brasília – DF, 2020.

BUTT, A.A.; HARVEY, J.; SABOORI, A.; OSTOVAR, M.; BEJARANO, M.; GARG, N (2021). Decision Support in Selecting Airfield Pavement Design Alternatives Using Life Cycle Assessment: Case Study of Nashville Airport. *Sustainability* 2021, 13, 299. <https://doi.org/10.3390/su13010299>.

CAMPOS, A. C. R. de. (2004). Método de Previsão de Desempenho de Irregularidade Longitudinal de para Pavimentos Asfálticos: Aplicação e Proposição de Critério de Ajuste. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2004. 273f.

CARNEIRO, R. de S., DURÁN, J. B. C., & OLIVEIRA, F. H. L. de. (2023). Análise do custo do ciclo de vida na avaliação de estratégias de manutenção e reabilitação em pavimento aeroportuário. *Transportes*, 31(1), e2740. <https://doi.org/10.58922/transportes.v31i1.2740>.

CICMANEC, L.; KUBICA, A.; MASLAN, J. (2025). LSTM and TCN application for airport surface distress detection, *Results in Engineering*, Volume 27, 2025, 105708, ISSN 2590-1230, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105708>.

CHAVES, J.W.R. & OLIVEIRA, F.H.L. de (2024). Impacts of Backcalculation Software Selection on Airport Flexible Pavements Using the Aircraft Classification Rating/Pavement Classification Rating Method. *Transportation Research Record*, 0(0).

- CHAVES, J. W. R.; FRANCELINO, C. A.; LEITE, M. de A.; ALMEIDA, L. C. de; OLIVEIRA, F. H. L. de. Análise da condição estrutural de uma pista de pouso e decolagem a partir de dados deflectométricos. *Anais do ENACOR/RAPv 2025*, 2025. Disponível em: <https://enacorrappv.com.br/anais/2025/TT960.pdf>. Acesso em: (20 de janeiro de 2026). DOI: 10.21526/50rapv.158.
- CHEN, J.-S., HUANG, C.-C., CHEN, C.-H., & SU, K.-Y. (2008). Effect of Rubber Deposits on Runway Pavement Friction Characteristics. *Transportation Research Record*, 2068(1), 119-125. <https://doi.org/10.3141/2068-13>.
- CHEN, W.; YUAN, J.; LI, M. (2012). Application of GIS/GPS in Shanghai Airport Pavement Management System. 2012 International Workshop on Information and Electronics Engineering (IWIEE). 1877-7058 © 2011 Published by Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.proeng.2012.01.30. 2012.
- CHEN, X., & WANG, H. (2018). Life cycle assessment of asphalt pavement recycling for greenhouse gas emission with temporal aspect. *Journal of Cleaner Production*, 187, 148-157. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.207>.
- CHEN, Y.; XUE, J. (2025). Sustainable urban freight: pavement, environmental, and economic impacts of heavy-duty electric trucks, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 149, 2025, 105033, ISSN 1361-9209, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2025.105033>.
- CHO, K.; VAN MERRIËNBOER, B.; BAHDANAU, D.; BENGIO, Y (2014). On the properties of neural machine translation: encoder-decoder approaches. arXiv preprint arXiv:1409.1259, 2014.
- CHUNG, J.; GULCEHRE, C.; CHO, K.; BENGIO, Y (2014). Empirical evaluation of gated recurrent neural networks on sequence modeling. arXiv preprint arXiv:1412.3555, 2014.
- CREMONESE, P. E.; MATTOS, J. R. G. (2021). Influência do módulo de resiliência da mistura asfáltica na vida de projeto de pavimento aeroportuário: estudo de caso do Aeroporto Regional do Vale do Taquari. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v. 13, n. 3, p. 99-109, set. 2021. ISSN 2176-7270.
- DAS, A.; KHAN, Md. N.; BARUA, S.; RAHMAN, Md. M. (2015). An Evaluation of Life Cycle Cost Analysis of Airport Pavement. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, v. 4, n. 08, p. 352-356, 2015. ISSN 2278-0181.
- DE LUCA, M., & DELL'ACQUA, G. (2014). Runway surface friction characteristics assessment for Lamezia Terme airfield pavement management system. *Journal of Air Transport Management*, 34, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2013.06.015>.
- DE MOURA, I.R., DOS SANTOS SILVA, F.J., COSTA, L.H.G. *et al* (2021). Airport pavement evaluation systems for maintenance strategies development: a systematic literature review. *Int. J. Pavement Res. Technol.* 14, 676–687 (2021). <https://doi-org.ez11.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s42947-020-0255-1>.
- DI MASCIO, P.; RAGNOLI, A.; PORTAS, S.; SANTONI, M. (2021). Monitor Activity for the Implementation of a Pavement—Management System at Cagliari Airport. *Sustainability* 2021, 13, 9837. <https://doi.org/10.3390/su13179837>.

- DI MASCIO, P.; MORETTI, L. (2019). Implementation of a pavement management system for maintenance and rehabilitation of airport surfaces. *Case Studies in Construction Materials*, 11, e00251. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00251>.
- DI GRAZIANO, A.; RAGUSA, E.; MARCHETTA, V.; PALUMBOB, A. (2021). Analysis of an Airport Pavement Management System during the Implementation Phase. *KSCE Journal of Civil Engineering* (2021) 25(4):1424-1432 DOI 10.1007/s12205-021-1884-x pISSN 1226-7988, eISSN 1976-3808.
- DI GRAZIANO, A.; RAGUSA, E.; PAPPALARDO, G.; DELFINO, E. (2025). BIM Integrated Airport Pavement Management System, *Transportation Research Procedia*, Volume 90, 2025, Pages 591-598, ISSN 2352-1465, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2025.06.103>.
- DNIT (2024). Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Relatório Sintético de Composição de Custos. Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO), Ceará, Abril, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro>. Acesso em: 03 de outubro de 2024.
- DING, T.; SUN, L.; CHEN, Z. Optimal strategy of pavement preventive maintenance considering life-cycle cost analysis. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, v. 96, p. 1679-1685, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.190>.
- DONG, Qiao; HUANG, Baoshan (2012). Evaluation of Effectiveness and Cost-Effectiveness of Asphalt Pavement Rehabilitations Utilizing LTPP Data. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 138, No. 6, June 1, 2012. ©ASCE, ISSN0733-947X/2012/6-681-689.
- DURÁN, J. B. C.; FERNANDES JÚNIOR, J. L. (2014). Uso do PAVEAIR para a gerência de pavimentos aeroportuários: Estudo de caso no Aeroporto Estadual de Araraquara. 28º Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes ANPET, 2014.
- DURÁN, J. B. C. (2015). Sistema de gerência de pavimentos aeroportuários: estudo de caso no aeroporto estadual de Araraquara. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Ciências, Programa de Engenharia de Transportes). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, 2015. 204f.
- ELHADIDY, A. A.; EL-BADAWY, S. M.; ELBELTAGI, E. E. (2019). A simplified pavement condition index regression model for pavement evaluation. *International Journal of Pavement Engineering*, 22(5), 643-652. <https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1633579>.
- FAA (2009). Federal Aviation Administration. Advisory Circular AC 150/5320-6E: Airport Pavement Design and Evaluation. 2009.
- FAA (2014). Federal Aviation Administration. Advisory Circular AC 150/5380-6C: Guidelines and Procedures for Maintenance of Airport Pavements. 2014.
- FAA (2016). Federal Aviation Administration. Airport Pavement Design and Evaluation: Advisory Circular AC 150/5320-6F. Washington, DC, 2016.
- FERREIRA, Adelino; SANTOS, João. LCCA system for pavement management: sensitivity analysis to the discount rate. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, v. 53, p. 1174-1183, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.966>.
- FORTNEY, Evan M.; SCHULDT, Steven J.; BROWN, Sarah L. (2022). A Statistical Principal Component Regression-Based Approach to Modeling the Degradative Effects of Local Climate

and Traffic on Airfield Pavement Performance. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, v. 148, n. 2, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1061/JPEODX.00003>.

FUENTES, L. G., GUNARATNE, M., De LEÓN IZEPPI, E., FLINTSCH, G. W., & MARTINEZ, G. (2012). Determination of Pavement Macrottexture Limit for Use in International Friction Index Model. *Transportation Research Record*, 2306(1), 138-143. <https://doi.org/10.3141/2306-16>.

FWA, T. F.; CHONG, G. J.; LIU, S. B. (1997). Decision support model for managing skid resistance of airport pavements. *Journal of Transportation Engineering*, v. 123, n. 6, p. 429-436, 1997. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(1997)123:6(429).

FWA, T. F. (2024). Pavement skid resistance properties for safe aircraft operations. *Journal of Road Engineering*, v. 4, p. 361-385, 2024. DOI: 10.1016/j.jreng.2024.11.002.

GENDREAU, Michel; SORIANO, Patrick. (1998). Airport pavement management systems: an appraisal of existing methodologies. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 32, n. 3, p. 197-214, abr. 1998. Disponível em: 1. Acesso em: 7 out. 2023.

GÉRON, A (2017). *Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn*. First Edit. O'Reilly, Sebastopol, CA, 2017.

GOMES, D. T. (2005). *Redes Neurais Recorrentes Para Previsão de Séries Temporais de Memórias Curta e Longa*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica. UNICAMP, Campinas, São Paulo, 2005. 153f.

GUNARATNE, Manjriker; BANDARA, Nilanga; WEERASINGHE, R.; SEALS, Ronald (2000). Correlations for the prediction of wear and friction of tire-pavement interaction based on surface macrottexture properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 12, n. 1, p. 46-54, 2000. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2000)12:1(46).

HEIN, David K., and BRIAN Aho. 2011. *Preserving Our Airfield Pavements.*, American Society of Civil Engineers (ASCE) in Transportation and Development Institute Congress 2011. doi:10.1061/41167(398)25.

HEUVINCK, T. (2015). *Life Cycle Cost Analysis: Application to an airport pavement*. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:195887031>. Acesso em: 18 de julho de 2024.

HOCHREITER, S.; SCHMIDHUBER, J. (1997). Long Short-Term Memory. *Neural Comput.* 1997; 9 (8): 1735–1780. doi: <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>.

HUANG, B.; FWA, T. F.; CHAN, W. T.; LIU, S. B. (2004). Implementation of GIS/GPS-Based Airport Pavement Management System - A Case Study. In: *6th International Conference on Managing Pavements: The Lessons, The Challenges, The Way Ahead*, 2004, Brisbane. *Proceedings...* Brisbane: Queensland Department of Main Roads, 2004. p. 1-8. Disponível em: 1. Acesso em: 7 out. 2023.

HUMPHRIES, E., & LEE, J. (2015). Evaluation of Pavement Preservation and Maintenance Activities at General Aviation Airports in Texas. *Transportation Research Record*. <https://doi.org/10.3141/2471-07>.

ICEA (2024). Instituto de Controle do Espaço Aéreo. Portal da Divisão de Pesquisa. Produto Climatológico. Disponível em: [https://pesquisa.icea.decea.mil.br/prod\\_climaer/](https://pesquisa.icea.decea.mil.br/prod_climaer/). Acesso em: 03 de outubro de 2024.

IRFAN, M., KHURSHID, M.B., IQBAL, S. et al (2015). Framework for airfield pavements management—an approach based on cost-effectiveness analysis. *Eur. Transp. Res. Rev.* 7, 13 (2015). <https://doi.org/10.1007/s12544-015-0165-5>.

ISSA, A.; SAMANEH, H.; GHANIM, M. (2022). Predicting pavement condition index using artificial neural networks approach. *Ain Shams Engineering Journal* 13 (2022) 101490. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.04.033> 2090-4479.

KEISER, D., SCHNOOR, L. H., PUPKES, B., & FREITAG, M. (2023). Life cycle assessment in aviation: A systematic literature review of applications, methodological approaches and challenges. *Journal of Air Transport Management*, 110, 102418. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2023.102418>.

LEE, M., CHOU, C., & LI, K. (2009). Automatic measurement of runway grooving construction for pavement skid evaluation. *Automation in Construction*, 18(6), 856-863. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2009.03.013>.

LIU, Y.; YANG, J.; LI, L.; WEI, H.; JIN, R.; YU, B. Life cycle cost and environmental assessment of pervious concrete pavements compared with conventional concrete pavements. *Journal of Cleaner Production*, v. 260, 120933, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120933>.

MACEDO, M. C. (2005). Estudo para a base técnica de um sistema de gerência de pavimentos para redes regionais de aeroportos. São José dos Campos - SP: Tese de doutorado - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 218f.

MAIA, C. L.; SOUSA, J. L. C. de; ALEXANDRE, N. P.; OLIVEIRA, F. H. L. de. (2022). Avaliação qualitativa e funcional de pistas de pouso e decolagem brasileira. 36° ANPET (Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. Fortaleza, Ceará, 2022).

MAIA, C. L.; ROCHA, M. I. de M.; ALMEIDA, A. F. M.; LEITE, M. O.; OLIVEIRA, F. H. L. de. (2023). Análise da resistência à derrapagem de pista de pouso e decolagem pré e pós-obra de reabilitação. 25° Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 48ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv). Foz do Iguaçu, Paraná, 2023.

MAIA, A. de O., OLIVEIRA, F. H. L. de, & SILVA, C. A. U. da. (2023). Um método de apoio à gestão para análise das condições de aderência em pavimentos aeroportuários. *Conexões - Ciência E Tecnologia*, 17, e022016. <https://doi.org/10.21439/conexoes.v17i0.2905>.

MAIA, C. L.; DA SILVA, C. A. U.; OLIVEIRA, F. H. L. de; SALES, R. de S. (2025). Classificação Da segurança Operacional De Pistas De Pouso E Decolagem Usando Redes Multilayer Perceptron. *Conexões - Ciência E Tecnologia*, vol. 19, novembro de 2025, p. e025030, doi:10.21439/conexoes.v19.3736.

MALLARAPU, Chandrika; SEGUIN, Émilie; GORNHOF, Mark; GEORGE, Koerner; MILLETT, David. Federal Aviation Administration Airfield Pavement Life Cycle Assessment Tool (FAALCAN). Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2025. Disponível em: <https://trrjournalonline.trb.org/doi/10.1177/03611981241240826>. Acesso em: 18 jun. 2025.

MIDTFJORD, A. D., BIN, R. D., & HUSEBY, A. B. (2022). A decision support system for safer airplane landings: Predicting runway conditions using XGBoost and explainable AI. *Cold Regions Science and Technology*, 199, 103556. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103556>.

MOURA, G. B. de. (2018). Redes Neurais Recorrentes para Classificação de Estruturas Retóricas. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação. Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Paraná, 2018. 64f.

MOURA, I. R. de. (2021). Proposta de um modelo de avaliação de pavimentos aeroportuários para determinação de estratégias de manutenção. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, 2021. 186f.

NASCIMENTO, F. A. C. do; SILVA, M. A. V. da. A method for calculating and evaluating user costs in airport pavement management systems. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Transport*, v. 176, n. 7, p. 405–420, 2021. DOI: 10.1680/jtran.20.00014.

NELSON, D. M. Q. (2017). Uso de Redes Neurais recorrentes para Previsão de Séries Temporais Financeiras. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação. Instituto de Ciência Exatas da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2017. 73f.

NOWAK, G. (2013). LCCA and Pavement Design for the New Parallel Runway at Calgary International Airport. In: *Airfield and Highway Pavement 2013: Sustainable and Efficient Pavements*. Reston: American Society of Civil Engineers, 2013. p. 154-163. doi: 10.1061/9780784413005.013.

OLIVEIRA, F. H. L. (2009). Proposição de estratégias de manutenção de pavimentos aeroportuários baseadas na macrotextura e no atrito: estudo de caso do Aeroporto Internacional de Fortaleza. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia de Transportes). Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE, 2009.

OLIVEIRA, F. H. L. (2016). Desenvolvimento de um modelo de gerenciamento de pavimentos aeroportuários como apoio à tomada de decisão sobre estratégias de manutenção e reabilitação. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia de Transportes). Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE, 2016.

OLIVEIRA, V. C.; MAIA, C. L.; SOUSA, J. L. C. de.; CASTELO BRANCO, V. T.; OLIVEIRA, F. H. L. de. (2023). Análise da correlação entre parâmetros funcional e de aderência pneu-pavimento em pista de pouso e decolagem. 25º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 48ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv). Foz do Iguaçu, Paraná, 2023.

OLIVEIRA, F. H. L. de; NOBRE JÚNIOR, E. F. (2008). Correção de patologia em pavimento asfáltico aeroportuário. VII Simpósio de Transporte Aéreo. *Sitraer* 7, n. 370, p. 183-192, 2008, Rio de Janeiro, RJ.

PANTIGOSO, J. F. G. (1998). Uso dos Sistemas de Informação Geográfica para a integração da gerência de pavimentos urbanos com as atividades das concessionárias de serviços públicos. 1998. Dissertação (Mestrado em Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998. doi:10.11606/D.18.2018.tde-30012018-150517. Acesso em: 2024-07-10.

PERRONI, J. C. B.; LIMA, A. B. de. (2019). Sistema de gerenciamento de pavimentos aeroportuários – visão da Agência Nacional de Aviação Civil. *Revista Conexão Sipaer*. v. 10, n. 3 (2019). p. 67-72.

PITTENGER, Dominique M. Evaluating sustainability of selected airport pavement treatments with life-cycle cost, raw material consumption, and Greenroads standards. *Transportation*

Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 2206, p. 61-68, 2011. DOI: <https://doi.org/10.3141/2206-08>.

PREDIGER, P. & TOZETTO, R. (2014). Modelos de previsão de desempenho. Programa de Pós Graduação em Engenharia e Meio Ambiente. Sistemas de Gerenciamento de Infraestrutura. Universidade de Passo Fundo. 10p. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/263850477\\_MODELOS\\_DE\\_PREVISAO\\_DE\\_DE\\_SEMPENHO](https://www.researchgate.net/publication/263850477_MODELOS_DE_PREVISAO_DE_DE_SEMPENHO). Acesso: 17 de julho de 2024.

PHI, W (2018). Illustrated guide to LSTMs and GRUs: a step-by-step explanation. Towards Data Science, 2018. Disponível em: <https://towardsdatascience.com/illustrated-guide-to-lstms-and-gru-s-a-step-by-step-explanation-44e9eb85bf21>. Acesso em: 22 set. 2024.

QABAJA, M.; LABEEDI, A. (2020). An investigation of the airport pavement management system (APMS). International Journal of Advanced Engineering Science and Applications, v. 1, n. 1, p. 27-33, 2020. Disponível em: 1. Acesso em: 7 out. 2023.

QUARIGUASI, J. B. F.; DE OLIVEIRA, F. H. L.; SOARES E REIS, S. D. (2021). Modelo de previsão do coeficiente de atrito para pista de pouso e decolagem com uso de redes neurais artificiais. *Transportes*, [S. l.], v. 29, n. 2, p. 2401, 2021. DOI: 10.14295/transportes.v29i2.2401. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/2401>. Acesso em: 09 outubro. 2023.

QUARIGUASI, J. B. F.; DE OLIVEIRA, F. H. L.; REIS, S. D. S. (2019). Estudo preliminar sobre proposição de modelo de previsão para o coeficiente de atrito medido em pista de pouso e decolagem. In: SITRAER XVIII–Air Transportation Symposium. 2019. p. 9.

QUARIGUASI, J. B. F.; ALMEIDA, L. C.; OLIVEIRA, F. H. L. de (2018). Análise da aderência pneu-pavimento aeroportuário em revestimento de camada porosa de atrito. Anais do 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET. Gramado, Rio Grande do Sul, 2018.

RADA, G. R.; SCHWARTZ, C. W.; WITCZAK, M. W.; RABINOW, S. D. (1992). Integrated Pavement Management System for Kennedy International Airport. Journal of Transportation Engineering, Vol. 118, No. 5, September/October 1992. ©ASCE ISSN 0733-947X/92/0005-0666/\$1.00 + \$.15 per page. Paper No. 719.

RAMOS, Bernardo Antonio Silva; LIMA, Dario Cardoso de; PITANGA, Heraldo Nunes; SILVA, Taciano Oliveira da (2017). Aplicação de métodos de dimensionamento de pavimentos aeroportuários da FAA ao Aeroporto Internacional Presidente Juscelino Kubitschek. *Transportes*, v. 25, n. 4, 2017. DOI: 10.14295/transportes.v25i4.1180.

RODRIGUES FILHO, O. S. (2006). Características de aderência de revestimentos asfálticos aeroportuários - estudo de caso do Aeroporto Internacional de São Paulo/Congonhas. 2006. 263 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

SALES, R. De S., Oliveira, F.H.L. de & Prado, L. De A. (2021). Performance of tire-asphalt pavement adherence according to rubber removal on runways. International journal of pavement engineering, 23(10), pp.3566–3576. <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1907577>.

- SANTILLI, Sérgio Ricardo; CORREIA, Natália de Souza (2024). Evaluating Cumulative Damage Factor (CDF) of 20 Brazilian Airfield Pavement structures using FAARFIELD and BAKFAA. Análise do fator de dano acumulado (CDF) de 20 pavimentos aeroportuários brasileiros utilizando FAARFIELD e BAKFAA. *Transportes*, v. 32, n. 2, 2024. DOI: 10.58922/transportes.v32i2.2973.
- SANTOS, B.; ALMEIDA, P. G.; FEITOSA, I.; LIMA, D. (2020). Validation of an indirect data collection method to assess airport pavement condition. *Case Studies in Construction Materials* 13 (2020) e00419. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00419>.
- SCHMITT, L.; LEVASSEUR, A.; VAILLANCOURT, M.; LACHANCE-TREMBLAY, E. (2025). Life cycle assessment of various pavement rehabilitation techniques: A case study, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 139, 2025, 104476, ISSN 1361-9209, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104476>.
- SILVA, L. P. S. (2008). Aderência pneu-pavimento em revestimentos asfálticos aeroportuários. 2008. 134 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) — Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.
- SILVA, William de Paula; RODY, Henrique Apolinário (2016). Dimensionamento de pavimentos aeroportuários pelo método da FAA: caso Aeroporto Internacional de Foz do Iguaçu (SBFI). *Projectus*, Rio de Janeiro, v. 1, n. 2, p. 50-57, abr./jun. 2016.
- SILVA, T. F. A. da. (2020). Framework para a Configuração e Treino de Redes Neurais Utilizando Otimização Bayesiana / Framework for the Configuration and Training of Neural Networks Using Bayesian Optimization. Ph.D. Dissertation. Instituto Politécnico do Porto (Portugal). Advisor(s) Praça, Isabel and Gomes, Luis. Order Number: AAI28992483.
- SHAHIN, M. Y. (1994). *Pavement Management for Airports, Roads, and Parking Lots*. Chapman & Hall, 1994. ISBN-10: 0-387-23464-0. e-ISBN 0-387-23435-9. ISBN-13: 978-0387-23464-9
- SHAHNAZARI, H.; TUTUNCHIAN, M.; MASHAYEKHI, M.; AMINI, A. A. (2012). Application of Soft Computing for Prediction of Pavement Condition Index. *Journal of Transportation Engineering*. 138. 1495-1506. 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000454.
- SHEN, W., CEYLAN, H., GOPALAKRISHNAN, K., KIM, S., TAYLOR, P. C., & REHMANN, C. R. (2016). Life cycle assessment of heated apron pavement system operations. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 48, 316-331. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.08.006>
- SIDESS, A.; RAVINA, A.; OGED, E. (2020). A model for predicting the deterioration of the pavement condition index. *International Journal of Pavement Engineering*, 22(13), 1625–1636. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1714044>.
- SOUSA, J. L. C. de. (2024). Análise do custo do ciclo de vida em rodovias federais do estado do Ceará. 2024. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024.
- SPANCERSKI, J. S.; SANTOS, J. A. A. dos. (2021). Previsão da Produtividade de Arroz: Uma aplicação de Redes Neurais Recorrentes LSTM. *REVISTA CEREUS*, v. 13, n. 2, p. 163-175, 5 jul. 2021.

TIGHE, S.; COVALT, M. (2008). Implementation of an Airport Pavement Management System. TRANSPORTATION RESEARCH CIRCULAR E-C127. Transportation Research Board.

TOFAIL, M. MD.; OH, E.; CHAI, G.; BELL, P. (2020). An overview of the airport pavement management systems (APMS). ISSN: 1997-1400 DOI: <https://doi.org/10.1007/s42947-020-6011-8> Chinese Society of Pavement Engineering. Production and hosting by Springer Nature. 2020.

TURK, J., MLADENović, A., KNEZ, F., BRAS, V., ŠAJNA, A., ČOPAR, A., & SLANC, K. (2014). Tar-containing reclaimed asphalt – Environmental and cost assessments for two treatment scenarios. *Journal of Cleaner Production*, 81, 201-210. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.031>.

WALLS, J. and SMITH, M. R. (1998). US Department of Transportation. Federal Highway Administration (FHWA). Life-Cycle Cost Analysis in Pavement Design. Technical Bulletin. Publication No. FHWA-SA-98-079. 1998.

WANG, H., THAKKAR, C., CHEN, X., & MURREL, S. (2016). Life-cycle assessment of airport pavement design alternatives for energy and environmental impacts. *Journal of Cleaner Production*, 133, 163-171. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.090>.

WESOŁOWSKI, Mariusz; BLACHA, Krzysztof. (2019). Evaluation of airfield pavement micro and macrotexture in the light of skid resistance (friction coefficient) measurements. *MATEC Web of Conferences*, v. 262, p. 05017, 2019. DOI: 10.1051/mateconf/201926205017. Disponível em: [https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2019/11/mateconf\\_krynica2018\\_05017.pdf](https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2019/11/mateconf_krynica2018_05017.pdf). Acesso em: 7 jul. 2024.

WESOŁOWSKI, M and IWANOWSKI, P. (2020). Evaluation of Asphalt Concrete Airport Pavement Conditions Based on the Airfield Pavement Condition Index (APCI) in Scope of Flight Safety. *Aerospace* 2020, 7, 78; doi:10.3390/aerospace7060078.

WORLD BANK GROUP (2024). State and Trends of Carbon Pricing Dashboard. Disponível em: <https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/compliance/price>. Acesso em: 03 de outubro de 2024.

YUAN, J., & MOONEY, M. A. (2003). Development of Adaptive Performance Models for Oklahoma Airfield Pavement Management System. *Transportation Research Record*. <https://doi.org/10.3141/1853-06>.

ZAKI, B. M.; BABASHAMSI, P.; SHAHRIR, A. H.; MILAD, A.; HASSAN, N. A.; YUSOFF, N. I. Md. (2021). The impact of economic analysis methods on project decision-making in airport pavement management. *Jurnal Teknologi*, [S. l.], v. 83, n. 3, p. 11–19, 2021. DOI: 10.11113/jurnalteknologi.v83.14366. Disponível em: <https://journals.utm.my/jurnalteknologi/article/view/14366>.. Acesso em: 19 jul. 2024.

ZHANG, H.; KEOLEIAN, G. A.; LEPECH, M. D. An integrated life cycle assessment and life cycle analysis model for pavement overlay systems. In: BIONDINI, F.; FRANGOPOL, D. M. (ed.). *Life-Cycle Civil Engineering*. London: Taylor & Francis Group, 2008. p. 907-912. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203885307.ch141>.

ZHIREN, L.; XIANGHUA, Y. (2009). Research and Development of GIS Airport Pavement Management System Based on MapX. 2009 Second International Conference on Intelligent

Computation Technology and Automation. 978-0-7695-3804-4/09 \$26.00 © 2009 IEEE DOI 10.1109/ICICTA.2009.813.

ZIEJA, M.; WESOŁOWSKI, M.; BLACHA, K.; IWANOWSKI, P. (2021). Analysis of the Anti-Skid Properties of New Airfield Pavements in Aspect of Applicable Requirements. *Coatings* 2021, 11, 778. <https://doi.org/10.3390/coatings11070778>.

ZHIXING CAI, A., LIN LI, B., YUPING HU, C., WENTING LUO, D., & CHUNMIAN LIN, E. (2019). Automated groove identification and measurement using long short-term memory unit. *Measurement*, 141, 152-161. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.03.071>.

ZHOU, Q., OKTE, E., & AL-QADI, I. L. (2021). Predicting Pavement Roughness Using Deep Learning Algorithms. *Transportation Research Record*. <https://doi.org/10.1177/03611981211023765>.