



ALGUNS ASPECTOS OPERACIONAIS E AMBIENTAIS INCORPORADOS A UM SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS: UMA CONTRIBUIÇÃO METODOLÓGICA À LUZ DA ANÁLISE DO CICLO DE VIDA

Filipe Almeida Corrêa do Nascimento

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Transportes.

Orientador: Marcelino Aurelio Vieira da Silva

Rio de Janeiro

Março de 2021

ALGUNS ASPECTOS OPERACIONAIS E AMBIENTAIS INCORPORADOS A UM SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS: UMA CONTRIBUIÇÃO METODOLÓGICA À LUZ DA ANÁLISE DO CICLO DE VIDA

Filipe Almeida Corrêa do Nascimento

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES.

Orientador: Marcelino Aurelio Vieira da Silva

Aprovada por: Prof. Marcelino Aurelio Vieira da Silva

Prof. Elton Fernandes

Prof. Antonio Carlos Rodrigues Guimarães

Prof^a. Liedi Legi Bariani Bernucci

Dr. Luis Alberto Herrmann do Nascimento

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2021

Nascimento, Filipe Almeida Corrêa do

Alguns aspectos operacionais e ambientais incorporados a um sistema de gerenciamento de pavimentos aeroportuários: uma contribuição metodológica à luz da análise do ciclo de vida / Filipe Almeida Corrêa do Nascimento. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2021.

XIII, 155 p: il.; 29,7 cm.

Orientador: Marcelino Aurelio Vieira da Silva

Tese (doutorado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia de Transportes, 2021.

Referências Bibliográficas: p. 142-155

1. Sistema de gerenciamento de pavimentos aeroportuários. 2. Análise do ciclo de vida. I. Silva, Marcelino Aurelio Vieira da. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes. III. Título.

Dedico este trabalho à minha amada esposa Kellen e
ao meu recém-nascido filho Luiz Filipe.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

ALGUNS ASPECTOS OPERACIONAIS E AMBIENTAIS INCORPORADOS A UM SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS: UMA CONTRIBUIÇÃO METODOLÓGICA À LUZ DA ANÁLISE DO CICLO DE VIDA

Filipe Almeida Corrêa do Nascimento

Março/2021

Orientador: Marcelino Aurelio Vieira da Silva

Programa: Engenharia de Transportes

Um sistema pavimentado de pistas de pouso e decolagem, pistas de táxi e pátios são fundamentais para garantir a plena funcionalidade de tão oneroso ativo. Além dos custos de construção, esses pavimentos em especial necessitam de investimentos constantes em atividades de manutenção e reabilitação (M&R) ao longo de toda a vida útil, face às elevadas solicitações de tráfego impostas a essa estrutura. O sistema de gerenciamento de pavimentos aeroportuários (SGPA) surge nesse momento de necessidade de racionalização dos recursos, não apenas os financeiros, mas também os naturais. O presente trabalho desenvolve um procedimento metodológico, baseado em Análise de Custo do Ciclo de Vida (ACCV) e em Análise de Ciclo de Vida (ACV) para suplantar esses óbices. O método, composto por cinco etapas integradas, propõe o cálculo racional de custos advindos da necessidade da interdição da pista de pouso e decolagem para os serviços de M&R, baseado em técnicas de aprendizado de máquina, e o levantamento sistemático dos impactos ambientais advindos das alternativas de M&R preconizadas pelo SGPA tradicional. Esses componentes financeiros e ambientais são, então, concomitantemente considerados em uma modelagem de Análise Envoltória de Dados (DEA). Durante o estudo de caso, os resultados mostraram que o método é capaz de selecionar, para cada segmento homogêneo do pavimento, a alternativa com a melhor eficiência econômica e ambiental. As previsões de despesas oriundas da fase de ACCV também se tornaram mais robustas com a incorporação dos custos baseados em tempo de interdição de pista de pouso, denominados custos indiretos.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

SOME OPERATIONAL AND ENVIRONMENTAL ASPECTS INCORPORATED
INTO AN AIRPORT PAVEMENT MANAGEMENT SYSTEM: A
METHODOLOGICAL CONTRIBUTION IN THE LIGHT OF LIFE CYCLE
ANALYSIS

Filipe Almeida Corrêa do Nascimento

March/2021

Advisor: Marcelino Aurelio Vieira da Silva

Department: Transportation Engineering

A paved system of runways, taxiways, and patios is key to ensuring the full functionality of costly assets. In addition to construction costs, these pavements, in particular, require constant investments in maintenance and rehabilitation (M&R) activities throughout their lifetime, in the face of high traffic requests imposed on this structure. The airport pavement management system (APMS) arises at this time of need for rationalization of resources, not only financial ones but also natural ones. The present work develops a methodological procedure based on Life Cycle Cost Analysis (LCCA) and Life Cycle Analysis (LCA) to overcome these obstacles. The method, composed of five integrated stages, proposes the rational calculation of costs arising from the need for the runway closure for M&R services, based on machine learning techniques, and the systematic survey of environmental impacts arising from the M&R alternatives recommended by the traditional APMS. These financial and environmental components are then concomitantly considered in a Data Envelopment Analysis (DEA) modeling. During the case study, the results showed that the method could select the alternative with the best economic and environmental efficiency for each homogeneous segment of the pavement. The expense forecasts arising from the ACCV phase have also become more robust with the incorporation of costs based on runway closure time, called indirect costs.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Considerações iniciais	1
1.2	Formulação do problema	3
1.3	Justificativa.....	4
1.4	Premissa e hipóteses.....	9
1.5	Objetivos da pesquisa	9
1.6	Estrutura da tese	10
2	O SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS.....	12
2.1	Considerações iniciais	12
2.2	Etapas de um sistema de gerenciamento de pavimentos aeroportuários	14
2.3	Sistema de gerenciamento de pavimentos aeroportuários no Brasil.....	20
2.4	Considerações finais do capítulo.....	25
3	ANÁLISE DE CUSTO DO CICLO DE VIDA E ANÁLISE DO CICLO DE VIDA	26
3.1	Considerações iniciais	26
3.2	Análise de custo do ciclo de vida em pavimentos	27
3.3	Análise do ciclo de vida em pavimentos	33
3.4	Integração entre ACCV e ACV: uma tomada de decisão	37
3.5	Considerações finais do capítulo.....	49
4	PROPOSTA DE PROCEDIMENTO METODOLÓGICO PARA UM SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS.....	51
4.1	Considerações iniciais	51
4.2	Descrição das cinco grandes etapas do SGPA proposto.....	53
4.2.1	Projeções Estruturais	53
4.2.2	Projeções Operacionais.....	55

4.2.3	Análise de Custo do Ciclo de Vida.....	59
4.2.4	Análise do Ciclo de Vida.....	60
4.2.5	Sistema de Suporte à Decisão.....	62
5	ESTUDO DE CASO: APLICAÇÃO DO PROPOSTO SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS.....	64
5.1	Considerações iniciais	64
5.2	Resultados da combinação 1: aplicação das cinco grandes etapas do SGPA proposto	66
5.2.1	Projeções Estruturais	66
5.2.2	Projeções Operacionais.....	86
5.2.3	Análise de Custo do Ciclo de Vida.....	96
5.2.4	Análise do Ciclo de Vida.....	97
5.2.5	Sistema de Suporte a Decisão.....	104
5.3	Resultados das demais combinações do planejamento do experimento	110
5.3.1	Projeções Estruturais	110
5.3.2	Projeções Operacionais.....	114
5.3.3	Análise de Custo do Ciclo de Vida.....	121
5.3.4	Análise do Ciclo de Vida.....	123
5.3.5	Sistema de Suporte a Decisão.....	124
5.4	Efeitos e interações entre as variáveis do sistema	130
5.5	Análise comparativa entre sistemas de suporte à decisão	135
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS, LIMITAÇÕES E PROPOSIÇÕES PARA NOVOS ESTUDOS	138
6.1	Considerações finais e limitações.....	138
6.2	Proposições para novos estudos	140
	REFERÊNCIAS	142

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução temporal de 25% das palavras-chave de maior ocorrência da pesquisa bibliométrica realizada	6
Figura 2 – Etapas de refinamento das palavras-chave da pesquisa bibliométrica.....	7
Figura 3 – Evolução temporal do número de publicações na pesquisa bibliométrica.....	7
Figura 4 – Mapa baseado em dados bibliográficos de coocorrência de palavras-chave dessa pesquisa.....	8
Figura 5 – Etapas de um SGP típico (SHAHIN e WALTHER, 1990).....	13
Figura 6 – Exemplo de uma Matriz de Probabilidade de Transição (BUTT <i>et al.</i> , 1994)	17
Figura 7 – Escalas de PCI (FAA, 2014a)	18
Figura 8 – Evolução temporal do desempenho do pavimento (SHAHIN, 2005).....	21
Figura 9 – Estrutura de um SGPA (ANAC, 2017)	22
Figura 10 – Exemplo indicativo de árvore de decisão citado pelo Manual de SGPA (ANAC, 2017) e proposto por PANTIGOSO (1998).....	24
Figura 11 – Fatores de custos de uma ACCV (BABASHAMSI <i>et al.</i> , 2016).....	29
Figura 12 – Modelo de seleção de pavimentos rodoviários em DEA (NASCIMENTO <i>et al.</i> , 2020).....	40
Figura 13 – Algoritmo de seleção de variáveis proposto por ABREU <i>et al.</i> (2005).....	46
Figura 14 – Proposta de procedimento metodológico elaborado por essa tese.....	52
Figura 15 – Procedimento para a etapa de Projeções Estruturais do método proposto..	53
Figura 16 – Procedimento para a etapa de Projeções Operacionais do método proposto	56
Figura 17 – Procedimento para a etapa de ACCV do método proposto	60
Figura 18 – Procedimento para a etapa de ACV do método proposto	61
Figura 19 – Procedimento para a etapa de suporte à decisão do método proposto	62
Figura 20 – Localização das janelas de inspeção	68
Figura 21 – Localização das seções avaliadas da pista 11L-29R, em planta	75
Figura 22 – Concentração de defeitos por área típica nos pavimentos flexíveis.....	76
Figura 23 – Classificação do PCI dos segmentos homogêneos	76
Figura 24 – VPL Estrutural agregado por cenário – Atrito adequado.....	86
Figura 25 – Previsão de demanda anual de passageiros no horizonte 2019 a 2026.....	89
Figura 26 – Previsão de demanda mensal de passageiros no horizonte 2019 a 2026	90
Figura 27 – VPL Operacional agregado por cenário – Atrito adequado, regime integral de trabalho e previsão de demanda média.....	96

Figura 28 – Impactos ambientais normalizados (World 2000) dos serviços unitários de M&R.....	99
Figura 29 – Mapa de fluxos para a ecotoxicidade aquática marinha no serviço RES..	100
Figura 30 – Impactos ambientais normalizados (World 2000) dos cenários completos de M&R.....	101
Figura 31 – Matriz de correlação de Pearson das variáveis do estudo de caso	106
Figura 32 – Sistema DEA escolhido pelo método proposto.....	106
Figura 33 – VPL Estrutural agregado por cenário – Atrito inadequado.....	114
Figura 34 – Distribuição horária do movimento de passageiros do Aeroporto Internacional de Brasília em fevereiro de 2017.....	116
Figura 35 – Efeito observado no estudo de caso das políticas de intervenção sobre os custos do ciclo de vida.....	131
Figura 36 – Efeito observado no estudo de caso do regime de trabalho sobre os custos do ciclo de vida.....	131
Figura 37 – Efeito observado no estudo de caso do cenário de previsão de demanda sobre os custos do ciclo de vida	132
Figura 38 – Efeito observado no estudo de caso das políticas de intervenção sobre os impactos do ciclo de vida	132
Figura 39 – Efeito observado no estudo de caso do regime de trabalho sobre os impactos do ciclo de vida.....	133
Figura 40 – Efeito observado no estudo de caso da previsão de demanda sobre os impactos do ciclo de vida.....	133
Figura 41 – Interação observada no estudo de caso entre política de intervenção e regime de trabalho sobre os custos indiretos	134
Figura 42 – Interação observada no estudo de caso entre previsão de demanda e regime de trabalho sobre os custos indiretos	134
Figura 43 – Interação observada no estudo de caso entre política de intervenção e regime de trabalho sobre os custos indiretos	135

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Matriz de intervenções de M&R proposta por BATISTA (2015).....	19
Tabela 2 – Frequência, em meses, para a medição do índice de serventia do pavimento (ANAC, 2020a)	20
Tabela 3 – Frequência mínima das medições ou procedimentos na pista de pouso (ANAC, 2020a).....	21
Tabela 4 – Publicações da base bibliográfica dessa tese versando sobre SGPA e AACV	30
Tabela 5 – Etapas do ciclo de vida e indicadores ambientais examinados em estudos recentes (NASCIMENTO <i>et al.</i> , 2020)	35
Tabela 6 – Exemplo de uma matriz de eficiência cruzada (DOYLE e GREEN, 1994) .	45
Tabela 7 – Combinações de resultados do planejamento de experimento	65
Tabela 8 – Localização das janelas de inspeção.....	66
Tabela 9 – Espessuras verificadas nas janelas de inspeção	69
Tabela 10 – Valores retroanalizados de módulo das camadas do lado esquerdo, linha de 3 metros	70
Tabela 11 – Valores retroanalizados de módulo das camadas do lado direito, linha de 3 metros	70
Tabela 12 – Valores retroanalizados de módulo das camadas do lado esquerdo, linha de 6 metros	71
Tabela 13 – Valores retroanalizados de módulo das camadas do lado direito, linha de 6 metros	71
Tabela 14 – Número informado de decolagens domésticas na PPD 11L-29R, por tipo de aeronave.....	72
Tabela 15 – Número informado de decolagens internacionais na PPD 11L-29R, por tipo de aeronave	73
Tabela 16 – Valores de CDF obtidos por meio do <i>software</i> FAARFIELD	74
Tabela 17 – Inventário da pista 11L-29R	75
Tabela 18 – PCI atual e futuro no cenário sem intervenções de M&R	78
Tabela 19 – Plano de M&R para o Cenário 1 (PCI mínimo = 70) – Atrito adequado ...	79
Tabela 20 – Plano de M&R para o Cenário 2 (PCI mínimo = 55) – Atrito adequado ...	80
Tabela 21 – Plano de M&R para o Cenário 3 (PCI mínimo = 85) – Atrito adequado ...	81
Tabela 22 – PCI futuro no Plano de M&R do Cenário 1 (PCI mínimo = 70) – Atrito adequado.....	82
Tabela 23 – PCI futuro no Plano de M&R do Cenário 2 (PCI mínimo = 55) – Atrito adequado.....	83
Tabela 24 – PCI futuro no Plano de M&R do Cenário 3 (PCI mínimo = 85) – Atrito adequado.....	84

Tabela 25 – Orçamento unitário dos serviços de M&R	85
Tabela 26 – Valores do teste t das variáveis selecionadas pela regressão linear múltipla	88
Tabela 27 – Valores de avaliação dos algoritmos regressores de demanda de passageiros	88
Tabela 28 – Tempo de interdição do pavimento (TIP), em horas – Atrito adequado	91
Tabela 29 – Fluxo de caixa sem qualquer M&R	92
Tabela 30 – Fluxo de caixa do Cenário 1	93
Tabela 31 – Fluxo de caixa do Cenário 2	94
Tabela 32 – Fluxo de caixa do Cenário 3	95
Tabela 33 – Custos e parâmetros da ACCV por segmento homogêneo.....	97
Tabela 34 – Distâncias médias de transporte (DMT) adotadas no estudo de caso.....	98
Tabela 35 – Quantidade de insumos necessários para M&R, por unidade de área (m ²)	99
Tabela 36 – Impactos ambientais calculados para o Cenário 1	102
Tabela 37 - Impactos ambientais calculados para o Cenário 2.....	103
Tabela 38 - Impactos ambientais calculados para o Cenário 3.....	104
Tabela 39 – Medidas de eficiência, ineficiência e eficiência composta encontradas pelo método proposto	107
Tabela 40 – Resultado da seleção de cenários de M&R do modelo proposto.....	109
Tabela 41 – Plano de M&R para o Cenário 1 (PCI mínimo = 70) – Atrito inadequado	111
Tabela 42 – Plano de M&R para o Cenário 2 (PCI mínimo = 55) – Atrito inadequado	112
Tabela 43 – Plano de M&R para o Cenário 3 (PCI mínimo = 85) – Atrito inadequado	113
Tabela 44 – Tempo de interdição do pavimento (TIP), em horas – Atrito inadequado	115
Tabela 45 – Previsão de demanda de passageiros (PAX) e lucro operacional bruto (LOB) para intervenções do tipo “atrito adequado” e regime de trabalho integral.....	117
Tabela 46 – Previsão de demanda de passageiros (PAX) e lucro operacional bruto (LOB) para intervenções do tipo “atrito inadequado” e regime de trabalho fora do pico	118
Tabela 47 – Previsão de demanda de passageiros (PAX) e lucro operacional bruto (LOB) para intervenções do tipo “atrito adequado” e regime de trabalho fora do pico	119
Tabela 48 – Previsão de demanda de passageiros (PAX) e lucro operacional bruto (LOB) para intervenções do tipo “atrito inadequado” e regime de trabalho integral	120
Tabela 49 – Custos diretos, indiretos e dos usuários da ACCV calculados para cada uma das combinações de fatores do planejamento do experimento, dentro dos cenários propostos.....	122
Tabela 50 – Impactos ambientais normalizados (<i>World 2000</i>) calculados por políticas de intervenção de M&R do estudo de caso	124

Tabela 51 – Variáveis de entrada selecionadas para o sistema DEA VRS do estudo de caso, por combinação do planejamento do experimento	125
Tabela 52 – Quantidade de seções do estudo de caso integrantes de cada cenário, segundo o critério da maior eficiência composta.....	127
Tabela 53 – Cálculo dos custos do ciclo de vida, dos impactos do ciclo de vida e do movimento de passageiros e PCI, resultados pela atribuição do modelo proposto ao estudo de caso	129
Tabela 54 – Comparativo entre análise de custo-benefício e o SGPA proposto, aplicados na combinação 5 do planejamento do experimento.....	137

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

As discussões sobre os limites da capacidade da biosfera em absorver os efeitos da atividade humana originaram os primeiros conceitos de “desenvolvimento sustentável”. Esse meio antrópico é mutável e subordinado ao grau de desenvolvimento tecnológico e organização social, econômica e cultural. Uma versão de definição dessa expressão é advinda da década de 1960 e discutia o esgotamento das fontes de matérias-primas e abordava a incapacidade dos ecossistemas de se recuperarem dos danos causados pelo avanço tecnológico (PASETTO *et al.*, 2017). BRUNDTLAND (1987), por sua vez, atribuiu a esse conceito uma visão mais abrangente e defendeu que existe a possibilidade de se gerar crescimento econômico associado à preservação das necessidades das futuras gerações. Em termos práticos, ele sugeriu incentivos tecnológicos para gerenciar a oferta e a demanda de recursos produtivos.

Na vertente de garantir um desenvolvimento econômico, a implantação de infraestruturas de transporte compatíveis é um vetor primordial a qualquer nação. Particularmente no caso brasileiro, a CNT (2019) defende que é necessária a promoção da sustentabilidade do transporte nacional, que figura como uma atividade base da economia. Essa estrutura é a responsável pela manutenção da cadeia produtiva, contribuindo com a movimentação de carga, serviços e passageiros.

De maneira especial no transporte de passageiros, o setor aéreo brasileiro vem se destacando na última década. O MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES, PORTOS E AVIAÇÃO CIVIL (2018), por meio do seu último Plano Aeroviário Nacional (PAN), destaca que, nesse período, a demanda por transporte aéreo dobrou, com observações de taxa de crescimento na ordem de 6,71% ao ano. Juntamente com a euforia do setor, o plano também alerta para a premente necessidade de maiores investimentos na infraestrutura aeroportuária. FERNANDES e PACHECO (2016) já alertavam para o fato de que o transporte aéreo no Brasil, desde o início dos anos 2000, vinha demonstrando dificuldade de atendimento à crescente demanda.

Dentro de uma infraestrutura aeroportuária, os valores envolvidos tomam grandes proporções, com especial atenção ao sistema de pistas e pátios, que necessitam de manutenções constantes durante toda a vida útil. Como exemplo, pode-se tomar o Aeroporto de São Gonçalo do Amarante (RN), que foi o primeiro aeroporto concedido à

iniciativa privada em leilão, em formato de Parceria Público-Privada (ANAC, 2020). Para que se possa ter noção dos valores envolvidos, o Poder Público investiu, de 1996 a 2014, o montante de R\$ 215.136.899,87 (duzentos e quinze milhões e cento e trinta e seis mil e oitocentos e noventa e nove reais e oitenta e sete centavos) para a construção do sistema de pista, pátio e acessos do Aeroporto de São Gonçalo do Amarante (RN) (TCU, 2014). Essa obra ocorreu por meio de Termos de Cooperação Técnica entre a Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária (INFRAERO) e o Departamento de Engenharia e Construção (DEC) do Exército Brasileiro.

Esse oneroso sistema de pistas de pouso e decolagem, pátios e pistas de táxi são compostos por pavimentos, que, por sua vez, necessitam de manutenção e supervisão constantes. Esses pavimentos são dimensionados para atender a uma determinada vida útil estabelecida em projeto, normalmente denominado ciclo. Dentro de cada ciclo, então, costuma-se empregar técnicas de manutenção e reabilitação (M&R) para corrigir ou amenizar eventuais defeitos do pavimento, de maneira a permitir que ele chegue ao fim de seu ciclo para uma posterior renovação. Apesar de dar enfoque ao modo rodoviário, DNIT (2006) faz a seguinte consideração sobre o desempenho dos pavimentos e seus ciclos:

Para que o pavimento apresente tal desempenho previsível dentro de cada ciclo, é necessário, conforme se expôs, que o pavimento seja continuamente e de forma crescente (Níveis de Esforço crescentes), em função da evolução das deteriorações, contemplado com adequadas intervenções de caráter corretivo e preventivo. Tais intervenções constituem as atividades de Conservação (em suas 3 modalidades). Quando se aproxima do final do Ciclo ($IRI \cong 3,5/4,0$) o pavimento, embora desfrutando ainda da devida Habilitação, passa a apresentar um desempenho próximo de sua condição limite permissível, no qual o processo de deterioração tenderá a crescer de forma acentuada, vindo a tornar anti-econômica, dentro do enfoque de otimização do custo total de transporte, a operação da Rodovia. Nessa oportunidade deve, então, ser projetado e executado o novo dimensionamento do pavimento de sorte a se atender a um novo ciclo de vida – repetindo-se então o processo, em ciclos sucessivos. (DNIT, 2006, p. 26)

Para a racionalização das necessidades de M&R, utiliza-se um conjunto de procedimentos e métodos para formulação de cenários, estimação do desempenho do pavimento e auxílio à tomada de decisão, dentro de determinados critérios. No setor aéreo, dá-se o nome de Sistema de Gerenciamento de Pavimentos Aeroportuários (SGPA) a esses procedimentos. Em definições clássicas sobre o assunto, o SGPA procura responder às seguintes questões: “Sob certas restrições orçamentárias, quais as medidas

de conservação e de restauração devem ser executadas, bem como quando e onde, de modo a se preservar o patrimônio representado pela infraestrutura existente e se obter o máximo retorno possível dos investimentos a serem realizados? Além disso, qual parcela dos recursos disponíveis deveria ser alocada para novas pavimentações?” (RODRIGUES, 2007).

Como se pode observar, o foco tradicional dos sistemas de gerenciamento de pavimentos permeia o ramo orçamentário, conjugado a estimativas de desempenho do pavimento. Entretanto, o pavimento contribui significativamente para o consumo de recursos naturais durante sua construção, manutenção e uso (SANTERO e HORVATH, 2009; SANTOS *et al.*, 2017).

Portanto, para a aplicação do conceito de BRUNDTLAND (1987), unindo a necessidade de crescimento econômico e a utilização racional dos recursos, parece razoável a proposição de um método mais abrangente, que incorpore também critérios e análises de emissões ao ambiente, seus possíveis impactos e/ou a necessidade de energia primária. Introduce-se, assim, a semente para um SGPA que incorpore aspectos econômicos e ambientais.

1.2 Formulação do problema

Dentro do aspecto econômico de um SGPA, uma das ferramentas mais utilizadas é a análise de custo do ciclo de vida (ACCV). Essa técnica envolve a associação de valores monetários de processos e transferências associados a um produto ou sistema (KEOLEIAN e SPITZLEY, 2006). Em geral, ela estima a viabilidade financeira da escolha de técnicas e processos técnicos considerando o longo prazo. Diversas agências reguladoras, como a *Federal Aviation Administration* (FAA) dos Estados Unidos da América e a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) do Brasil, utilizam essa ferramenta dentro de suas propostas de SGPA para seus respectivos países (FAA, 2014; ANAC, 2017). Entretanto, os custos envolvidos no reflexo operacional do aeroporto oriundo da aplicação de determinado cenário de M&R (necessidade de interdição da pista para execução de M&R, redução do movimento no aeroporto, entre outros) são estimados pelo usuário do sistema ou não são considerados. Esses custos, no âmbito da ACCV, são denominados custos indiretos/usuários. Mas, KHURSHID *et al.* (2009) relataram que os resultados de uma ACCV são significativamente impactados pela inclusão ou exclusão

dos custos indiretos/usuários. Apesar desse fato, PITTENGER (2011) relata que a literatura não revela qualquer modelo ACCV específico para pavimentos aeroportuários.

Além dos custos indiretos em ACCV, nenhuma das agências citadas incorporam aspectos ambientais na fase de tomada de decisão em seus SGPA. Esses sistemas, quando avaliam algum critério ambiental, o realiza após a decisão, calculando as emissões ou os impactos ambientais do cenário escolhido. Nos sistemas de transporte, a análise do ciclo de vida (ACV) é uma das ferramentas utilizadas sob a égide do desenvolvimento sustentável para avaliar diversas fases da vida de uma infraestrutura, compilando entradas e saídas de processos e insumos dessas etapas e verificando os potenciais impactos ambientais. Ela tem a vantagem de também englobar etapas do ciclo de vida dos processos e insumos, como a ACCV, e tem sido usada para otimizar o uso de recursos, garantindo a máxima durabilidade (SANTOS *et al.*, 2019).

Sem mudar drasticamente a tendência de análise de ciclo de vida que as agências reguladoras têm adotado, os seguintes questionamentos nortearam o problema de pesquisa do presente estudo:

1. É possível racionalizar os custos indiretos envolvidos em ACCV durante a montagem de cenários de M&R de um SGPA, em substituição aos custos estimados dos sistemas em vigor?
2. De que maneira uma ACV poderia ser incorporada a um modelo de SGPA para auxiliar a sua etapa de tomada de decisão?

As respostas a essas questões possuem o potencial de contribuir metodologicamente aos atuais SGPA, em particular ao caso brasileiro sugerido pela ANAC, que não considera qualquer questão ambiental em sua estrutura.

1.3 Justificativa

Além da constante busca pela melhoria dos processos que envolvem vultosos recursos (econômicos e ambientais), como é característico na construção e manutenção de sistemas de pistas em aeroportos, o trabalho justifica-se também com indicadores bibliométricos para o tema. Foi conduzida uma pesquisa nesse sentido, aos moldes do método proposto por ZUPIC e ČATER (2015), contendo as seguintes etapas: projeto de pesquisa; compilação dos dados bibliométricos; análise e visualização.

O objetivo da pesquisa bibliométrica foi verificar se o tema de Gerência de Infraestrutura apresenta temas ambientais relevantes no cenário científico, dentre os principais autores, instituições e revistas indexadas ao *Journal of Citation Reports* (JCR). Iniciou-se, então, a compilação dos dados, com auxílio do programa computacional *EndNote*, no período de 2006 a 2017. As bases de pesquisa utilizadas foram: *Web of Science*, *Scopus* e *Science Direct*. Após diversas tentativas com palavras-chave, os resultados obtidos, dentre os 1288 artigos encontrados, para o argumento de pesquisa “(pavement OR infrastructure) AND management” foram:

- Periódicos: 582 indexados no JCR;
- Autores: 2812 autores com publicações indexadas no JCR; e
- Palavras-chave: 6474 palavras-chave identificadas em publicações indexadas no JCR.

Dentre as 25% maiores ocorrências de palavras-chave encontradas, destacaram-se para o presente estudo: “*maintenance*” (106 ocorrências); “*rehabilitation*” (46 ocorrências); e “*life-cycle assessment*” (28 ocorrências). Essa última, em particular, mostrou uma forte evolução de ocorrências a partir do ano de 2014, conforme Figura 1. Ressalta-se, ainda, que no conjunto de dados estudado, *life-cycle assessment* não possuía nenhuma ocorrência até 2008 e apenas 4 ocorrências até 2011.

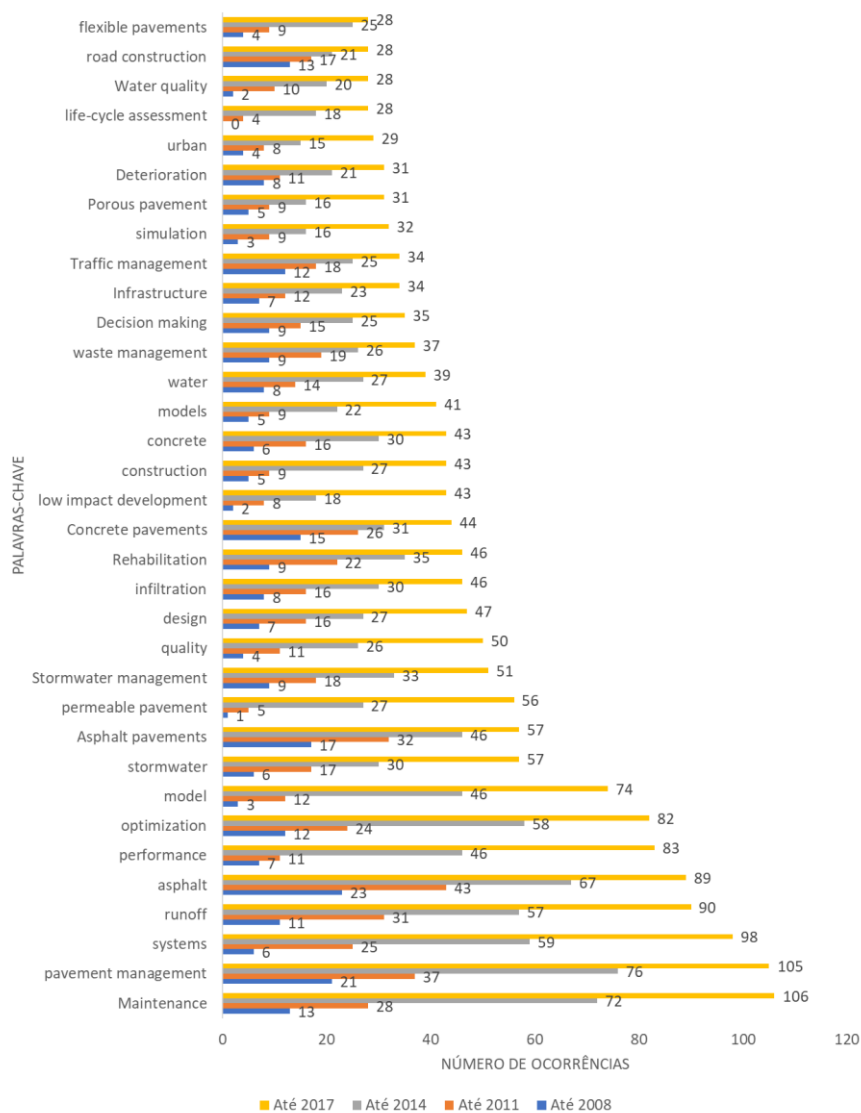


Figura 1 – Evolução temporal de 25% das palavras-chave de maior ocorrência da pesquisa bibliométrica realizada

A pesquisa prosseguiu pelos subtemas “*Decision making*”, “*Life-cycle*” e “*Environment*”, juntamente com outras palavras correlatas ou variações identificadas na pesquisa. Esse grupo de palavras-chave mostrou-se mais coerente com a proposta de pesquisa. De maneira resumida, as etapas de refinamento das palavras-chave foram definidas conforme Figura 2. Ao final, 108 publicações científicas compuseram o núcleo da base bibliográfica da presente pesquisa.

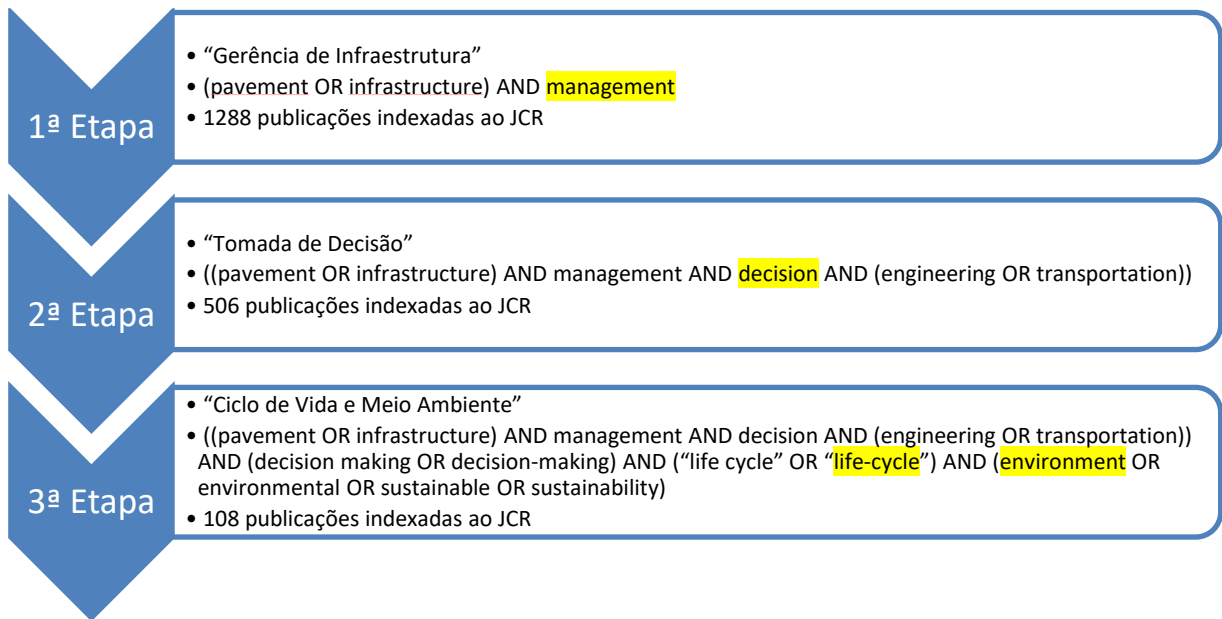


Figura 2 – Etapas de refinamento das palavras-chave da pesquisa bibliométrica

No aspecto temporal, a tendência do número de publicações com esses termos possui viés de alta. De 2006 a 2017, essa quantidade saiu de 41 e atingiu o patamar de 142, estabelecendo uma taxa de crescimento aproximada de 12% ao ano. A Figura 3 mostra essa evolução anual das publicações encontradas nessa pesquisa bibliométrica.

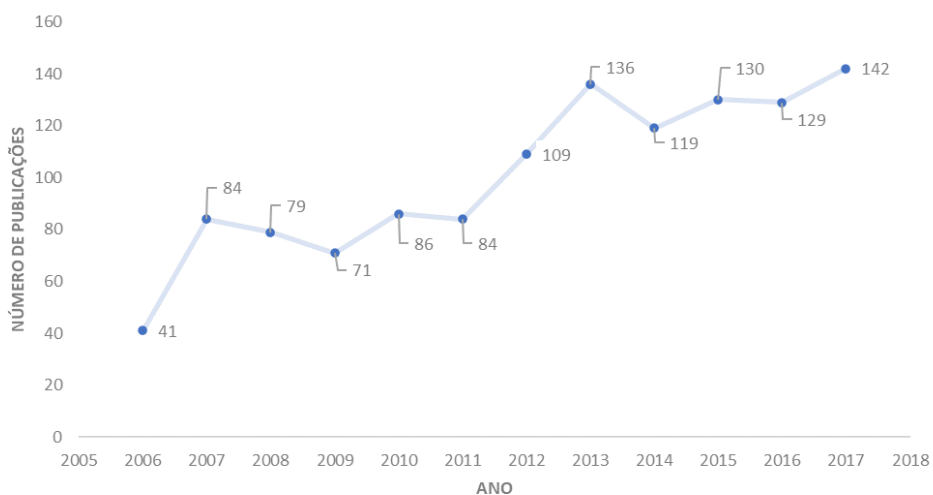


Figura 3 – Evolução temporal do número de publicações na pesquisa bibliométrica

Analisando os resultados de coocorrência de palavras-chave das publicações levantadas na segunda etapa, com o termo central “*decision making*” (Figura 4), a

decisão em pavimentos aeroportuários, porém com crescente relevância, o que aumenta suas chances de postulações contributivas e inéditas ao meio acadêmico.

1.4 Premissa e hipóteses

Para o desenvolvimento desse trabalho, algumas premissas foram adotadas:

- Dependendo do cenário de M&R e em determinadas situações de manobras operacionais para intervenções em pistas de pouso e decolagem, a capacidade do sistema de pistas do aeroporto é excedida;
- Quando a capacidade do sistema de pistas de um aeroporto é excedida, existem perdas de receitas que podem ser relevantes e não são computadas em SGPA, compondo os custos indiretos/usuário;
- A utilização de recursos ambientais não é levada em consideração nos SGPA das agências oficiais do setor aéreo e, portanto, não concorrem com o conceito de desenvolvimento sustentável; e
- Os métodos de ACV e ACCV são aplicáveis aos pavimentos aeroportuários, em analogia a diversas publicações desse teor no meio rodoviário. Existe a necessidade de adaptações desses métodos para considerar as características intrínsecas de um sistema de pistas de um aeroporto.

Considerando essas premissas, as hipóteses a serem testadas por essa tese são:

- Para as circunstâncias aplicáveis (capacidade do sistema de pistas de um aeroporto excedido), particularmente no cenário nacional, o cálculo racional dos custos indiretos/usuário e incorporados a uma ACCV conduzem a resultados financeiros significativamente diferentes daqueles oriundos da agência reguladora do setor; e
- O método proposto, com a adição de uma ACV em etapa anterior à tomada de decisão em SGPA, consegue reduzir os impactos ambientais do cenário de M&R escolhido quando comparado a uma seleção tradicional baseada exclusivamente em critérios financeiros e desempenho esperado pelo pavimento aeroportuário.

1.5 Objetivos da pesquisa

Para responder aos questionamentos formulados pelos problemas de pesquisa propostos, o objetivo geral deste trabalho é propor um método para um sistema de

gerenciamento de pavimentos aeroportuários, incorporando custos indiretos/usuário na análise de custo do ciclo de vida e aspectos ambientais de uma análise de ciclo de vida, em fase anterior à tomada de decisão. Particular destaque será dado ao caso brasileiro, visando complementar o atual sistema proposto pela ANAC (2017).

Para a execução do objetivo principal, vislumbra-se as seguintes etapas a serem cumpridas como objetivos específicos:

- Estudar o atual SGPA do cenário nacional e as proposições sobre o tema na base bibliográfica estruturada nessa tese;
- Propor um método de cálculo de custos indiretos/usuário para a fase de ACCV de um SGPA, baseado em previsão de demanda, bem como definir as suas limitações;
- Propor um procedimento metodológico para um sistema de gerenciamento de pavimentos aeroportuários, que incorpore, além dos aspectos estruturais do pavimento, os critérios de custos diretos da administração, custos indiretos decorrentes do déficit de movimento de passageiros, custos aos usuários e impactos do ciclo de vida, integrando esses resultados na fase de tomada de decisão;
- Coletar dados e estruturar um estudo de caso no Aeroporto Internacional de Brasília, a fim de ilustrar a aplicação do método proposto;
- Analisar a sensibilidade das principais variáveis de entrada do sistema proposto; e
- Comparar o sistema de gerenciamento de pavimentos aeroportuários proposto com uma análise de custo-benefício, avaliando os resultados.

1.6 Estrutura da tese

O presente trabalho está estruturado da seguinte maneira:

Capítulo 01: capítulo introdutório, que insere o leitor na temática da análise do ciclo de vida e na análise de custo do ciclo de vida aplicados a um sistema de gerenciamento de pavimentos aeroportuários. A mensagem principal é o esclarecimento quanto à justificativa do tema, apresentando inclusive uma breve pesquisa bibliométrica, além de estabelecer premissas, hipóteses e objetivos formulados para o método científico.

Capítulo 02: revisão da literatura quanto aos sistemas de gerenciamento de pavimentos aeroportuários; são descritos os conceitos gerais, as etapas consagradas na literatura e algumas adaptações dos sistemas rodoviários possíveis de serem adaptadas ao meio aeroportuário. Também são apresentadas as ideias publicadas em recente documento da agência reguladora nacional que trata sobre o tema.

Capítulo 03: revisão da literatura quanto à análise de custo do ciclo de vida e análise do ciclo de vida, trazendo os conceitos principais, limitações e dificuldades de implantação, tudo sob a ótica de uma proposta aplicação em sistemas de gerenciamento de pavimentos aeroportuários.

Capítulo 04: dedicado à apresentação do produto principal da tese: um método de gerenciamento de pavimento que mantém as boas práticas apresentadas na sua avaliação estrutural e funcional, mas procura contribuir com os custos envolvidos para a realização de serviços de M&R, particularmente naqueles que impactam os usuários. Também mostra práticas para o cálculo de impactos ambientais dos cenários de M&R e os incorpora em uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão.

Capítulo 05: aplicação do procedimento proposto em um estudo de caso, com procedimentos de ensaio e valores efetivamente praticados. Os resultados obtidos serão apresentados e discutidos. Os efeitos de alguns fatores e suas interações também serão estudados. Ao final, o método proposto será comparado a uma decisão baseada em análise de custo-benefício.

Capítulo 06: os principais resultados são consolidados nesse texto, procurando enfatizar as limitações e necessidades encontradas durante o desenvolvimento da tese.

Por fim, são citadas as referências que foram utilizadas para a realização do trabalho.

2 O SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS

2.1 Considerações iniciais

Os aeroportos possuem uma importância significativa e estratégica no desenvolvimento econômico de todos os países. Mantê-los em condições adequadas, financeira e operacionalmente estruturados, é crucial para as economias nacionais. Um dos principais fatores que pode interromper a operação do aeroporto ou, pelo menos, diminuir a sua capacidade são os defeitos em seu pavimento. Nas últimas décadas, a operação e a manutenção do pavimento aeroportuário têm recebido cada vez mais atenção na perspectiva da diminuição do custo do ciclo de vida e do aumento da sua vida útil, além de preservar um alto nível de manutenção e segurança (ANSARILARI e GOLROO, 2020).

De acordo com HUDSON *et al.* (1992), um sistema de gerenciamento de pavimento (SGP) elabora um programa de longo prazo por meio do aprimoramento dos procedimentos de tomada de decisão, garantindo compatibilidade entre as decisões em diferentes níveis. A adaptação desse sistema à realidade aeroportuária define o sistema de gerenciamento de pavimentos aeroportuários (SGPA). Trata-se de um sistema de apoio à decisão relacionado às estratégias de gestão técnica e economicamente sustentáveis para a manutenção das condições ideais dos pavimentos aeroportuários em conformidade com as disposições das legislações vigentes e por um período definido. O sistema é composto por procedimentos objetivos e sistemáticos (DI MASCIO e MORETTI, 2019):

- Inventário dos pavimentos existentes (ou seja, coleta e retenção de dados geométricos, técnicos e mecânicos);
- Monitoramento das performances, planejamento e agendamento de manutenção e reabilitação (M&R) dos pavimentos;
- Avaliação da efetividade; e
- Custos das atividades de manutenção a serem realizadas, bem como daquelas já efetivadas no passado.

Essas atividades são similares às etapas propostas por SHAHIN e WALTHER (1990). Essa semelhança fica mais nítida quando se observa a Figura 5. Divide-se um SGPA em dois níveis distintos (PANTUSO *et al.*, 2019):

- Nível de rede: considera-se a rede global de pavimentos (por exemplo, todos os pavimentos do aeroporto examinado ou pavimentos de vários aeroportos) e os principais objetivos são: avaliação das condições atuais por índices específicos; previsão das condições de curto e longo prazo utilizando métodos matemáticos; e identificação de elementos que requerem manutenção e/ou reabilitação; e
- Nível de projeto: considera-se uma seção específica do pavimento, entre as identificadas no gerenciamento da rede como necessitando de intervenções, e as configurações da decisão: comparação técnico-econômica entre intervenções de manutenção ou reabilitação (por exemplo, análise de custo/benefício) durante a vida útil; priorização de estratégias de manutenção; e identificação de trabalhos específicos de manutenção ou reabilitação, bem como seus materiais e métodos.

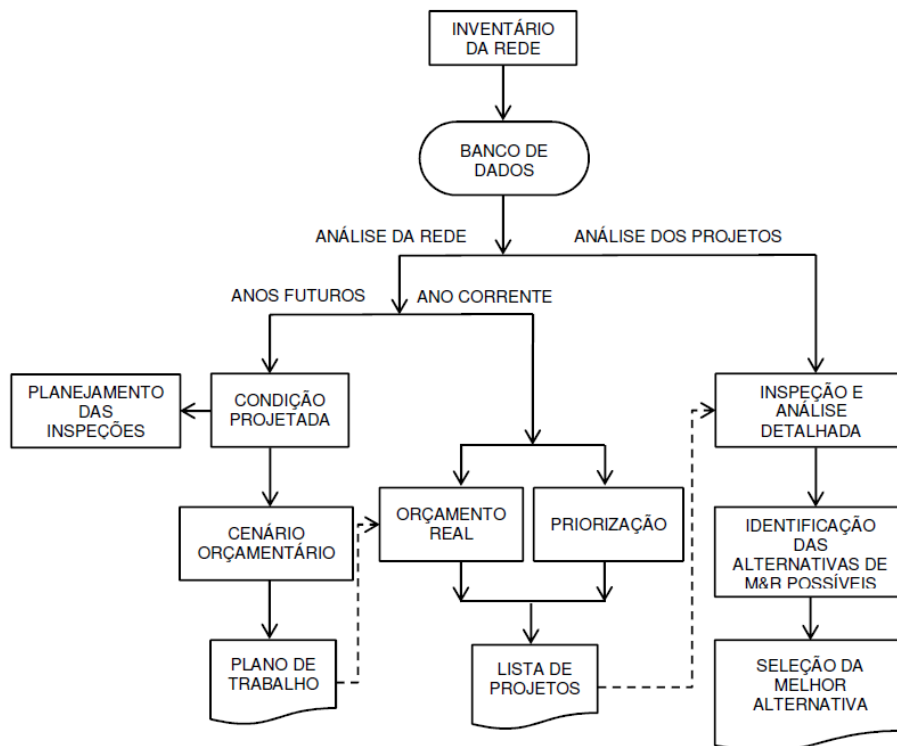


Figura 5 – Etapas de um SGP típico (SHAHIN e WALTHER, 1990)

Na base bibliográfica dessa tese sobre o assunto, existem estudos que abordam o uso de tecnologia e métodos eficientes para coleta de dados (MULRY *et al.*, 2015; PIGOZZI *et al.*, 2014) e outros que focam na aplicação de intervenções de manutenção do pavimento. Nessa última abordagem, ZOU e MADANAT (2012) investigaram o custo de atraso das ações de manutenção ou reconstrução, enquanto HUMPHRIES e LEE (2015) estudaram a limitação de recursos no desenvolvimento de um plano otimizado de manutenção e reabilitação (M&R).

2.2 Etapas de um sistema de gerenciamento de pavimentos aeroportuários

Uma rede de pavimentos aeroportuários pode ser formada no âmbito do próprio aeroporto (sistema de pistas e pátios) ou mesmo envolver diversos aeroportos próximos e centralmente administrados. O inventário da rede é formado por dados estruturais e funcionais do pavimento. Para coletar e gerenciar esses dados obtidos a partir de inspeções e medições no aeroporto, costuma-se dividir os pavimentos aeroportuários nas seguintes entidades físicas (ASTM, 2018):

- Tipo: parte da rede que executa uma função específica (pista de pouso e decolagem, pista de taxi, apron);
- Seção: parte de um mesmo tipo de pavimento que pode ser considerado homogêneo sob o perfil de manutenção (materiais utilizados, espessura de camadas, tráfego); a seção constitui o elemento mínimo para o planejamento de M&R; e
- Unidade amostral: parte da seção monitorada onde são medidas e observadas a deterioração no pavimento.

A segunda etapa do SGPA, constituída pelo sistema de monitoramento do pavimento aeroportuário, exige a consideração e avaliação de inúmeras propriedades físicas (características objetivas) e/ou índices de estado (características subjetivas) ao longo do tempo (GENDREAU e SORIANO, 1998). Para tornar esses procedimentos mais efetivos, a literatura mostra a utilização de alguns dispositivos de medição de alto desempenho para minimizar o número de veículos e pessoal (DI MASCIO e MORETTI, 2019; MULRY *et al.*, 2015; PIGOZZI *et al.*, 2014).

O monitoramento do pavimento é constituído por uma série de ensaios, conforme o SGPA adotado. Os ensaios mais comuns são:

- Capacidade de suporte em termos de Número de Classificação de Aeronaves (ACN – *Aircraft Classification Number*) e Número de Classificação do Pavimento (PCN – *Pavement Classification Number*) (FAA, 2014b), derivado das medidas de deflexão do equipamento FWD (*Falling Weight Deflectometer*);
- Uniformidade da superfície longitudinal do pavimento, em termos do Índice Internacional de Irregularidade (IRI – *International Roughness Index*) (ASTM, 2008);
- Defeitos de superfície do pavimento, utilizando veículo multifuncional (BARBARELLA et al., 2018);
- Resistência de derrapagem medida de acordo com ICAO (2002); e
- Defeitos do pavimento em termos do Índice de Condição de Pavimento (PCI – *Pavement Condition Index*) (ASTM, 2018).

A partir desses dados em inventário, é realizado o planejamento e o agendamento das atividades de M&R a partir das previsões de desempenho do pavimento. Um dos requisitos essenciais de um SGP para todos os tipos de pavimentos é um modelo de deterioração, que seja capaz de prever o desempenho do pavimento ao longo de sua vida útil. Nesse contexto, a utilização de dados históricos é primordial (ANSARILARI e GOLROO, 2020), como apresentado nos modelos desenvolvidos por MADANAT *et al.* (1995) e SUMAN e SINHA (2012), que utilizaram, respectivamente, Probit e Redes Neurais. ISMAIL *et al.* (2009) também mostraram que é possível desenvolver sistemas de gerenciamento de pavimentos por meio de sistemas especializados baseados em inteligência artificial. MOHAMMED *et al.* (2019) relataram o mesmo cenário, incluindo a descrição da modelagem da engenharia de transporte em sistemas especializados para facilitar o processo de tomada de decisão.

Os modelos de previsão são divididos em probabilísticos e determinísticos. SHAHIN (2005) propôs o uso de curvas de sobrevivência para planejamento de alternativas de M&R em áreas pavimentadas em geral, elaboradas com os dados de construção, conservação e restauração registrados pelo poder público. Outro método comum e prático para a previsão do desempenho do pavimento de maneira probabilística é a cadeia de Markov, que pode ser utilizada de forma diversificada com base na disponibilidade de um conjunto de dados (ANSARILARI e GOLROO, 2020). PULUGURTA *et al.* (2009) aplicaram a cadeia de Markov utilizando dados históricos

para desenvolver modelos de deterioração. ZOU e MADANAT (2012) empregaram conhecimento especializado para construir modelos markovianos de deterioração do pavimento.

A cadeia de Markov é um dos métodos mais eficazes no desenvolvimento de modelos de deterioração para uma malha pavimentada. A condição do sistema pode ser um dos níveis de condição discreta chamados de estado. A condição de um sistema é prevista por meio de um conjunto de Matrizes de Probabilidade de Transição (MPT) após um período chamado de estágio. Essas matrizes englobam uma série de probabilidades condicionais de eventos. A probabilidade condicional é descrita como a probabilidade de um sistema ser transitado para outro estado ou permanecer no mesmo nível após um estágio, dado que um sistema está em um estado específico de um estágio atual (WANG *et al.*, 1994). Supondo que um sistema só se deteriora (sem melhorias/tratamentos) ao longo do tempo, as células da parte triangular inferior da MPT são iguais a zero. Além disso, uma MPT pode ser mais simplificada se, por hipótese, um sistema não puder se deteriorar mais do que um estado em um estágio. Portanto, cada linha de uma MPT contém dois valores: uma probabilidade de permanecer no mesmo estado (ou seja, p_{ii}) e uma probabilidade de deterioração para um estado mais baixo (ou seja, p_{ii+1}). A cadeia de Markov começa com o vetor de probabilidade atual $P(t)$ e continua a prever a condição futura no estágio $t+1$, multiplicando este vetor pela MPT. Se as MPT em diferentes estágios forem idênticas, o processo da cadeia de Markov é chamado de homogêneo. No entanto, no caso de diferentes MPT para várias etapas, a cadeia de Markov é não homogênea; nesse caso, o processo é mais complicado, mas é considerado mais próximo da realidade (ANSARILARI e GOLROO, 2020). A Figura 6 exemplifica a MPT, onde as células $p(j)$ mantêm as condições do pavimento e as $q(j)$ as deterioram (BUTT *et al.*, 1994).

$$P = \begin{matrix}
& p(1) & q(1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
& 0 & p(2) & q(2) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
& 0 & 0 & p(3) & q(3) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
& 0 & 0 & 0 & p(4) & q(4) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
& 0 & 0 & 0 & 0 & p(5) & q(5) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
& 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p(6) & q(6) & 0 & 0 & 0 & 0 \\
& 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p(7) & q(7) & 0 & 0 & 0 \\
& 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p(8) & q(8) & 0 & 0 \\
& 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p(9) & q(9) & 0 \\
& 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1
\end{matrix}$$

Figura 6 – Exemplo de uma Matriz de Probabilidade de Transição (BUTT *et al.*, 1994)

A escolha das alternativas de M&R a serem utilizadas em cada período de análise depende do modelo de deterioração considerado. Nos modelos determinísticos, são utilizados índices de condição de pavimento combinados com sua idade (ANDERSON *et al.*, 1979). Nos casos rodoviários, o índice mais utilizado é o PSI (*Present Serviceability Index*), que representa o nível de serviço que um pavimento oferece aos seus usuários (SHAH *et al.*, 2013). No entanto, em ambiente aeroportuário, os serviços de manutenção são tradicionalmente escolhidos de acordo com o índice de condição do pavimento, ou PCI (*Pavement Condition Index*) (TAREFDER e RAHMAN, 2016). O PCI é normatizado pela ASTM (2018) e se configura como um indicador numérico que reflete a integridade estrutural e a condição operacional da superfície de um pavimento. Baseia-se em uma medição objetiva do tipo, gravidade e quantidade de defeitos. Ao projetar a taxa de deterioração, uma análise de custo do ciclo de vida pode ser realizada para várias alternativas de M&R. Não só a melhor alternativa pode ser selecionada, mas o tempo ideal de aplicação também pode ser determinado. Os valores do PCI variam de 0 a 100, como mostrado na Figura 7, onde 0 indica um pavimento rompido e 100 é um pavimento novo. Também se destacam as pontuações 70 e 55, que separam as classificações boa/média e média/ruim, respectivamente (FAA, 2014a).

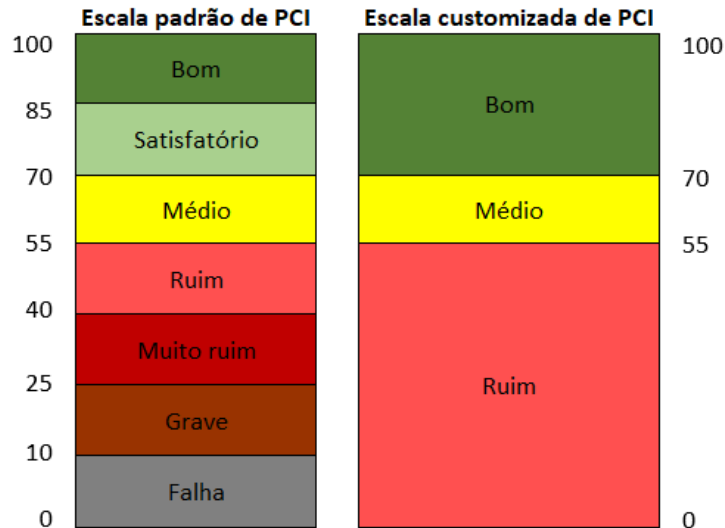


Figura 7 – Escalas de PCI (FAA, 2014a)

Esses modelos determinísticos, normalmente construídos em regressões múltiplas, tentam prever o valor futuro do PCI a partir de variáveis que expressam as condições do pavimento, como o tráfego, a idade do pavimento, idade da última intervenção de M&R, entre outras. MACEDO (2005) utilizou esse modelo para quatro redes de aeroportos. A regressão utilizada tem a forma da Equação 1, que é exclusivamente dependente da idade do pavimento.

$$PCI = \beta_0 + \beta_1.I + \beta_2.I^2 + \dots + \beta_x.I^x \quad (1)$$

Em que:

β_x são os coeficientes angulares; e

I é a idade do pavimento.

Até esse ponto, os pavimentos e suas seções já se encontram inventariados e com seu desempenho previsto. Entra em cena, então, a fase de montagem de alternativas de M&R. SHAHIN (1979) já apontava uma forte correlação entre o PCI e as intervenções de M&R em pavimentos aeroportuários. Alguns *softwares* aparecem na literatura para auxiliar esse processo de atribuição das ações de M&R. Os mais utilizados são o *PAVER* e o *FAA PAVEAIR*, ambos recomendados pela FAA (2014a). Eles classificam as ações

de M&R em quatro categorias: *Localized stop-gap* (manutenção localizada ou tapa-buraco); *Localized preventive* (manutenção localizada preventiva); *Global preventive* (manutenção preventiva global ou de grande extensão); e *Major* (restauração ou reforço). Cada tipo de M&R é adequado para uma determinada condição do pavimento e confere um valor adicional de PCI após a intervenção. BATISTA (2015) propôs uma matriz de intervenções com base no cenário nacional, conforme Tabela 1. Apesar de ter a sua aplicação limitada para alguns casos específicos, a sua aplicação depende da verificação do PCI, da capacidade estrutural e da avaliação de segurança, resumida pelo atrito. Essa matriz também prevê o PCI após a ação de M&R escolhida. Os tipos de intervenção são: MPR (Manutenção preventiva/rotineira), MCL (Manutenção corretiva leve), MCA (Manutenção corretiva de atrito), REAC (Reforço estrutural com aumento da capacidade), MC (Manutenção corretiva), MCARL (Manutenção corretiva de atrito com reparos localizados), RERL (Reforço estrutural com reparos localizados), RES (Reforço estrutural simples), RACE (Reconstrução com aumento de capacidade estrutural) e RT (Reconstrução total).

Tabela 1 – Matriz de intervenções de M&R proposta por BATISTA (2015)

TIPO DA INTERVENÇÃO	PCI	CAPACIDADE ESTRUTURAL INSUFICIENTE	ATRITO ADEQUADO	PCI APÓS MANUTENÇÃO	DESCRIÇÃO (Pavimento Flexível)
MPR	-	-	-	atual	Selagem de trincas, pequenos reparos superficiais.
MCL	entre 86 e 70	não	sim	atual + 10	Selagem de trincas, reparos superficiais.
MCA	entre 86 e 70	não	não	atual + 10	MPR mais camada porosa de atrito
REAC	entre 86 e 70	sim	-	100	Fresagem e recapeamento do pavimento
MC	entre 70 e 55	não	sim	atual + 15	Selagem de trincas, reparos superficiais.
MCARL	entre 70 e 55	não	não	atual + 15	Selagem de trincas, reparos no pavimento com recuperação da camada de base e camada porosa de atrito
ERL	entre 70 e 55	sim	-	100	Fresagem e recapeamento do pavimento, com recuperação da camada de base em parte da área
RES	entre 55 e 25	não	-	100	Fresagem e recapeamento do pavimento
RACE	entre 55 e 0	sim	-	100	Reconstrução do pavimento com aumento

					de sua capacidade estrutural
RT	entre 25 e 0	não	-	100	Reconstrução do pavimento mantendo suas características estruturais originais

2.3 Sistema de gerenciamento de pavimentos aeroportuários no Brasil

No contexto do Regulamento Brasileiro da Aviação Civil (RBAC) nº 153 (ANAC, 2020a), existe a imposição aos operadores de aeródromos de um plano de monitoração das condições estruturais e funcionais e frequências obrigatórias dos ensaios, além das ações de manutenção preventiva e corretiva em suas pistas. Em todas as áreas pavimentadas, o operador deve respeitar os limites temporais previstos na Tabela 2 para a determinação do índice de serventia do pavimento, além das verificações de defeitos no pavimento e dos desníveis e deformações.

Tabela 2 – Frequência, em meses, para a medição do índice de serventia do pavimento (ANAC, 2020a)

PISTA	FREQUÊNCIA (MESES)			
	CLASSE I-B	CLASSE II	CLASSE III	CLASSE IV
Pista de pouso e decolagem	24	24	18	12
Pista de táxi e pátio	48	48	36	24

Especialmente em pistas de pouso e decolagem, esse regulamento ainda estabelece que, além dos ensaios das demais áreas pavimentadas, a monitoração deve aumentar o rigor quanto às frequências e tipos de ensaios. A preocupação agora passa a ser os índices ligados à estrutura, função e segurança da pista, como irregularidade longitudinal, atrito, macrotextura e acúmulo de borracha. Essas novas frequências mínimas estabelecidas pelo RBAC nº 153, relacionadas aos ensaios mencionados, estão na Tabela 3. A média de pousos diários no último ano refere-se às aeronaves de asa fixa, com motor à reação, na cabeceira predominante da pista.

Tabela 3 – Frequência mínima das medições ou procedimentos na pista de pouso (ANAC, 2020a)

MÉDIA DE POUSOS DIÁRIOS NO ÚLTIMO ANO	FREQUÊNCIA MÍNIMA			
	IRI (MESES)	ATRITO (DIAS)	MACROTEXTURA (DIAS)	REMOÇÃO DE BORRACHA (DIAS)
Menor que 16	36	360	360	720
Maior ou igual a 16 e menor que 31	24	180	180	360
Maior ou igual a 31 e menor que 91	24	90	90	180
Maior ou igual a 91 e menor que 151	18	60	60	120
Maior ou igual a 151 e menor ou igual a 210	12	30	30	90
Maior que 210	12	15	30	60

Apesar do Apêndice C do RBAC nº 153 tecer comentários sobre como deve ser formado o programa de manutenção do aeródromo, não fica esclarecido o procedimento sistemático observado na literatura, que pudesse aproximá-lo a um SGPA. Então, a ANAC (2017) publicou a primeira edição do seu Manual de Sistema de Gerenciamento de Pavimentos Aeroportuários – SGPA. Ele recupera as premissas básicas, em termos econômicos, definidas por SHAHIN (2005) e ilustradas na Figura 8. Ele transmite a mensagem de que é necessário realizar ações de M&R em períodos considerados ótimos, sobre o ponto de vista econômico, para alcançar uma determinada viabilidade.

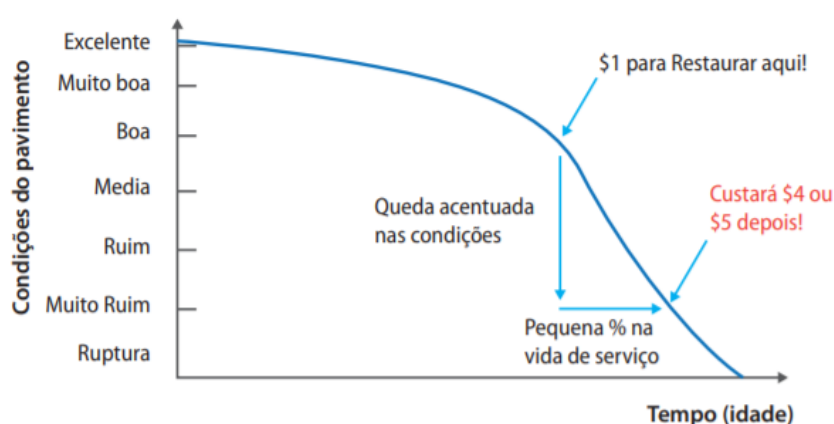


Figura 8 – Evolução temporal do desempenho do pavimento (SHAHIN, 2005)

O mesmo manual de SGPA (ANAC, 2017) define a estrutura recomendada para o procedimento proposto, conforme Figura 9. Ela também preconiza a consolidação de

um banco de dados, composto pelas avaliações estruturais, funcionais e de segurança, além do inventário da rede. Em seguida, a qualidade dos pavimentos é avaliada e as estratégias de aplicação dos recursos são montadas. Essa etapa também é dependente do modelo de previsão do pavimento, dos custos associados aos serviços de M&R e da priorização das áreas. O produto desse procedimento é o Programa de Conservação, que continua a ser retroalimentado pelo banco de dados atualizado.



Figura 9 – Estrutura de um SGPA (ANAC, 2017)

A fase do estudo das condições do pavimento exige uma série de ensaios. O manual de SGPA (ANAC, 2017) sugere, em nível estrutural, a adoção dos seguintes parâmetros: índice de suporte Califórnia (ISC), módulo de resiliência ou elasticidade, avaliação das tensões e deformações limites e realização de ensaios destrutivos, semi-destrutivos e não destrutivos (*Falling Weight Deflectometer*, *Ground Penetration Radar*, sondagens, *Dynamic Cone Penetrometer*, entre outros). Em nível funcional, a avaliação é consolidada pelo cálculo do PCI (ASTM, 2018). O método de cálculo do PCI é composto por valores deduzidos ou fatores de ponderação que se escalam de 0 a 100. Esse número indica o impacto dos defeitos na condição do pavimento, de acordo com a densidade da área afetada, tipo do defeito e sua severidade. O PCI da amostra é então calculado com a subtração desse valor deduzido do PCI máximo (100). ANAC (2017)

sugere a adoção do PCI igual a 70 como aquele Crítico de Manutenção e igual a 40 como Crítico de Serviço. Os seguintes defeitos são considerados para o cálculo do PCI:

- Trincas por fadiga, couro de jacaré (*Alligator Cracking*);
- Exsudação (*Bleeding*);
- Trincas em Bloco (*Block Cracking*);
- Corrugação (*Corrugation*);
- Depressão/Afundamento (*Depression*);
- Erosão por rápida propulsão do jato de aeronaves (*Jet Blast*);
- Trincas de reflexão, base de concreto (*Joint Reflection, PCC*);
- Trincas transversais e longitudinais (*Longitudinal & Transversal Cracking*);
- Deterioração por presença de óleo/combustível (*Oil Spillage*);
- Remendo (*Patching*);
- Agregado polido (*Polished Aggregate*);
- Desagregação (*Raveling*);
- Afundamento da trilha de roda, deformação permanente (*Rutting*);
- Solevamento da camada asfáltica devido à placa de concreto (*Shoving from PCC*);
- Escorregamento (*Slippage cracking*);
- Inchamento (*Swell*); e
- Desprendimento (*Weathering*).

O inventário de um pavimento, dentro desse SGPA (ANAC, 2017), tem o objetivo de consolidar os dados considerados importantes para futuras avaliações funcionais e estruturais. Ele também pode facilitar a construção do modelo de desempenho do pavimento. Trata-se de dados sobre localização, classe, geometria, materiais e espessuras das camadas, históricos de construção e demais intervenções, entre outros.

Quanto ao modelo de previsão de desempenho dos pavimentos, o Manual de SGPA (ANAC, 2017) não tece detalhes sobre os procedimentos para a sua construção. Entretanto, cita as mesmas categorias já descritas pela literatura, ou seja, modelos probabilísticos (curvas de sobrevivência, modelos de simulação, modelos markovianos) e determinísticos (desempenho estrutural ou funcional).

Como estratégias de aplicação de M&R em pistas aeroportuárias, o Manual de SGPA (ANAC, 2017) apresenta alguns tipos de intervenção em árvore de decisão, a partir da severidade e extensão dos defeitos e volume de tráfego. Esse procedimento foi proposto por PANTIGOSO (1998). Um exemplo de árvore de decisão para trincas por fadiga do revestimento é ilustrado pela Figura 10.

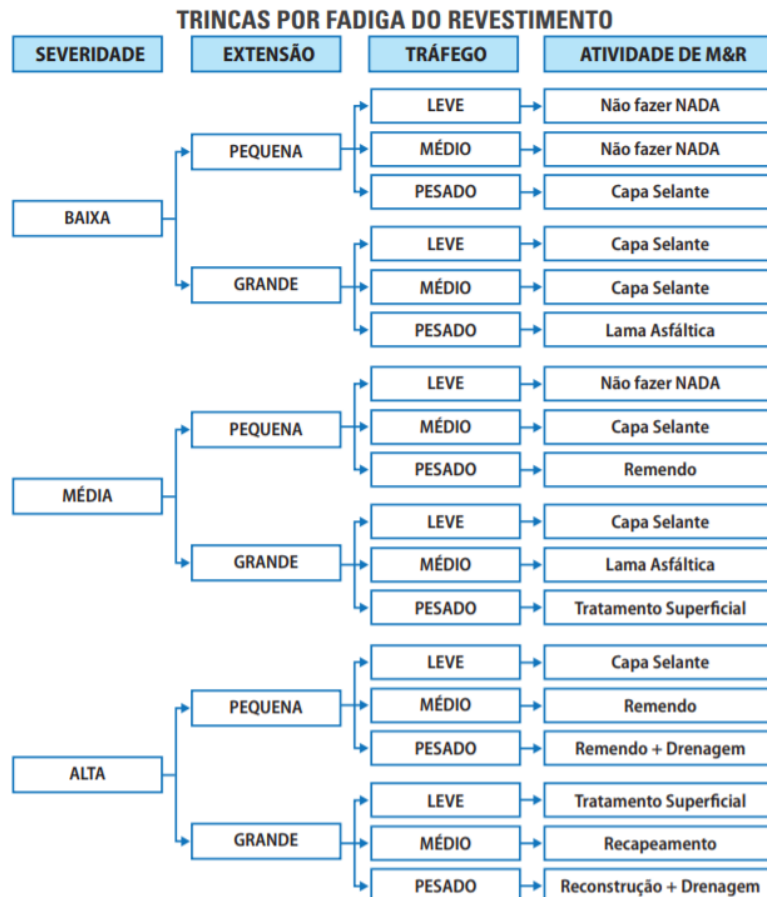


Figura 10 – Exemplo indicativo de árvore de decisão citado pelo Manual de SGPA (ANAC, 2017) e proposto por PANTIGOSO (1998)

Na estrutura do SGPA (Figura 9), existe ainda previsões de uma análise econômica e do estabelecimento de prioridades. No entanto, o Manual de SGPA (ANAC, 2017) não cita ou descreve esses procedimentos.

2.4 Considerações finais do capítulo

A revisão da literatura sobre o tema mostrou que, em geral, os SGPA são pouco estudados quando comparados ao meio rodoviário, mas é possível a realização de adaptações de algumas dessas práticas ao cenário aeroportuário. Para o método proposto pela tese, deve-se aproveitar as etapas principais de um SGPA tradicional (inventário dos pavimentos, monitoramento das performances, planejamento e agendamento de manutenção e reabilitação (M&R) dos pavimentos, avaliação da efetividade e custos das atividades de manutenção a serem realizadas.

Considerando as observações relatadas, a tese avaliará a pertinência da adoção do BBI como índice que sintetiza custos indiretos de manutenção das aeronaves e do pavimento em detrimento ao IRI, que se mostrou mais adequado à realidade rodoviária no cálculo dos custos de acréscimo de combustível.

O PCI é um índice bem difundido nos SGPA e, visando a simplicidade e aplicabilidade do método proposto, deve continuar a figurar como elemento principal para a montagem dos cenários de M&R. O método proposto pela tese deve avaliar, pelo menos, três cenários, contendo os valores de PCI de 85, 70 e 55, que são limítrofes das classificações superiores à média na escala padronizada.

As discussões sobre as técnicas e as políticas de intervenções de M&R em pavimentos aeroportuários não são objetivos da tese, já que cada realidade de aplicação do SGPA possui características próprias, envolvendo decisões administrativas e estratégicas do operador do aeródromo (contratos com fornecedores de insumos e serviços, horários de interdição, entre outros). Cada operador deverá, portanto, estabelecer suas próprias políticas de M&R e montar os cenários a partir dessa realidade.

Quanto ao recente Manual de SGPA publicado em âmbito nacional, os procedimentos de coleta de dados e inventário dos pavimentos mostraram-se adequados quando comparados com as práticas da literatura. No entanto, foram identificadas oportunidades de melhorias e discussões nas avaliações dos custos.

3 ANÁLISE DE CUSTO DO CICLO DE VIDA E ANÁLISE DO CICLO DE VIDA

3.1 Considerações iniciais

Tradicionalmente, os estudos de viabilidade de projetos alocam muita ênfase sobre os custos iniciais (HASAN et al., 2019). No entanto, todos os custos de projetos de baixa especificação, construção sem sistemas adequados de gestão da qualidade (inspeção esporádica e não controlada), bem como regimes de operação, manutenção e reabilitação não estruturados (M&R) ocorrem com certa frequência e trazem óbices aos gerenciamentos (HOOD et al., 2018). HASAN et al. (2019) relatam que existem benefícios monetários significativos quando são realizadas análises de custos durante toda a vida de uma rede rodoviária, representados por aumento do investimento e benefício a longo prazo para os usuários.

A análise de custos do ciclo de vida (ACCV) é um procedimento para a avaliação dos benefícios e retornos financeiros de qualquer investimento, analisando seus custos futuros juntamente com os custos iniciais. Embora a aplicação da ACCV na pavimentação tenha recebido considerável atenção nas últimas décadas, a aplicação prática do método ainda se mostra limitada (CABEZA et al., 2014). Aliada ao princípio de efetividade do custo, ela incorpora a ideia de sustentabilidade, mesclando um equilíbrio de tempo, qualidade e custo de investimento em construção. Os projetos de pavimentação podem ser concebidos de forma sustentável e econômica: projetados, construídos, gerenciados, mantidos e, em seguida, reabilitados ou reciclados. Isso significa que, se as justificativas de sustentabilidade forem adicionadas aos critérios econômicos ou monetários, as necessidades dos usuários podem ser mais bem atendidas e outros benefícios poderão ser alcançados se a análise for realizada para todo o ciclo de vida dos ativos da rede pavimentada (HASAN et al., 2019).

Já a análise do ciclo de vida (ACV) é um método concebido para avaliar os impactos ambientais relacionados ao consumo de energia, gases de efeito estufa e emissões de poluentes de processos e produtos (ISO, 2006). O sucesso de qualquer projeto de malha rodoviária, portanto, depende do equilíbrio entre as metas de custo e meio ambiente e a adesão das agências governamentais à legislação e normas vigentes sobre o tema (HASAN et al., 2019). Ela foi inicialmente proposta pela SETAC (*Society of*

Environmental Toxicology and Chemistry) em 1990 (FAVA *et al.*, 2014) e é definida como uma avaliação metodológica das ponderações ambientais de um produto por quantificação sistemática de impactos, como: consumo e esgotamento de recursos, eutrofização, mudanças climáticas, esgotamento da camada de ozônio, poluição sonora e outras implicações diretas e indiretas das atividades humanas no ecossistema, geradas durante todo o ciclo de vida (ISO, 2006). Esse processo também é conhecido pela expressão "do berço ao túmulo" (HASAN *et al.*, 2019).

3.2 Análise de custo do ciclo de vida em pavimentos

Na fase de custos de um SGPA, é comum a realização de uma análise de custo do ciclo de vida (ACCV) (APA, 2011). De acordo com a FHWA (2002), a ACCV é uma técnica de avaliação aplicável para considerar uma determinada decisão de investimento, uma vez que ajuda a determinar o melhor custo-benefício para o projeto.

O conceito de se obter mais benefícios com menor investimento não é uma ideia nova dentro da temática da pavimentação. Alguns pesquisadores (JINGNING, 2015; MIRZA e ALI, 2017) defendem a utilização da ACCV e das práticas de M&R para melhorar o cenário de tomada de decisão.

Para o desenvolvimento da metodologia ACCV em pavimentos, é necessário definir todas as suas etapas processuais (WALLS e SMITH, 1998). Os custos do ciclo de vida referem-se a todos os envolvidos na construção, manutenção e reabilitação do pavimento durante seu ciclo de vida completo. BABASHAMSI *et al.* (2016) definem a metodologia ACCV completa do pavimento em dez etapas:

- Definir o escopo do projeto;
- Estabelecer o quadro da ACCV;
- Desenvolver estratégias de alternativas de pavimento;
- Determinar o desempenho do pavimento e as atividades de manutenção e reabilitação esperadas (M&R);
- Estimar os custos diretos/proprietários;
- Estimar custos indiretos/usuários;
- Desenvolver o diagrama de fluxo de caixa;
- Calcular o custo do ciclo de vida;
- Interpretar o resultado da análise; e

- Reavaliar as estratégias do pavimento.

A ACCV já está integrada ao processo de tomada de decisão de diversas agências (APA, 2011). A comparação das alternativas viáveis desenvolvidas pelo operador da estrutura para atender às restrições funcionais e operacionais do pavimento é realizada de acordo com o custo anual uniforme equivalente (CAUE) ou o valor presente líquido (VPL) (IRFAN *et al.*, 2015; WALLS e SMITH, 1998). Esses indicadores econômicos são os mais utilizados nas aplicações ACCV (ZIMMERMAN *et al.*, 2000). No caso de manutenção e reabilitação (M&R) de pavimentos, a Equação 2 pode ser aplicada, trazendo todos os custos futuros previstos pelo plano para um valor presente por meio da aplicação de uma taxa de desconto (RANGARAJU *et al.*, 2008).

$$VPL = I + \sum_{k=1}^N F_k \left[\frac{1}{(1+i)^{n_k}} \right] - S \left[\frac{1}{(1+i)^{n_e}} \right] \quad (2)$$

Em que:

VPL é o valor presente líquido [\$];

I são os custos iniciais no primeiro ano de análise [\$];

N é o número total de custos incorridos durante todo o período de análise;

F_k são os custos futuros incorridos [\$];

I é a taxa de desconto anual;

n_k é o número de anos entre o início do período de análise até o custo de índice k;

S é o valor residual [\$]; e

n_e é o número de anos no período de análise.

Os custos envolvidos na ACCV geralmente são divididos entre custos diretos/proprietário e indiretos/usuário (BABASHAMSI *et al.*, 2016). A Figura 11 mostra esta divisão. Os custos diretos referem-se aos serviços de construção ou de M&R propriamente ditos, enquanto os custos indiretos representam os impactos da tomada de decisão entre as diversas alternativas sobre os usuários da infraestrutura.

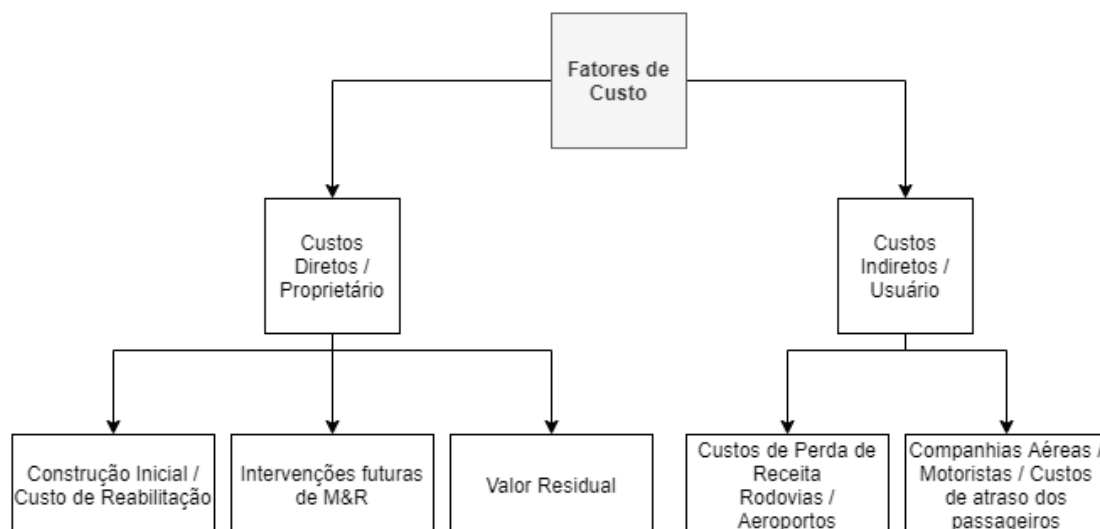


Figura 11 – Fatores de custos de uma ACCV (BABASHAMSI *et al.*, 2016)

No meio rodoviário, além dos custos diretos, ALQAHTANI e WHYTE (2013) defendem o cálculo de custos socioeconômicos e ambientais indiretos, tais como: acessibilidade e conforto; acidente e segurança; atrasos de tempo; e custos operacionais do veículo devido a congestionamentos, desvios e condições da área de construção. Os custos dos usuários devem ser adicionados às estimativas de custo do ciclo de vida dos ativos para melhor estimativa das despesas das partes interessadas. No ambiente aeroportuário, as perdas de receita devido ao serviço de manutenção em pistas totalmente ou parcialmente fechadas, quando computadas, são atribuídas a um percentual estimado de redução na movimentação de aeronaves, passageiros e cargas (HEUVINCK, 2015).

Um exemplo de aplicação de ACCV sobre projetos de M&R em meio rodoviário foi explorado por CHOI *et al.* (2016). O estudo, que abrangeu 39.000 seções rodoviárias e seus respectivos dados de gerenciamento, observou sensibilidade na ACCV aos indicadores de custos e ao carregamento de tráfego. O custo de manutenção da malha viária depende de diversos fatores atribuídos aos seus elementos contribuintes, por exemplo: idade e espessura do pavimento; congestionamento ocasionado por atividades de manutenção; variações temporais; objetivos políticos, administrativos e de investimento; e volume médio diário de veículos.

HASAN *et al.* (2019) afirmam que os custos dos usuários e os custos sociais ocultos são geralmente abordados nas pesquisas sobre ACCV aplicada em meio rodoviário. No entanto, os custos diretos do proprietário e de manutenção tiveram maior

ênfase. Outro trabalho (WENNSTRÖM e KARLSSON, 2016) demonstra que os custos com usuários podem ser críticos. No seu procedimento metodológico, ele verificou que a maior parte dos custos são devidos aos usuários da via.

Embora os custos diretos já estejam em um nível de precisão considerado razoável, a maioria das deficiências registradas na ACCV se deve à omissão ou imprecisão dos custos indiretos e dos custos ambientais (BABASHAMSI *et al.*, 2016). Uma pesquisa da *Federal Highway Administration* (FHWA) revelou que poucos estados adotam os custos indiretos/ usuários em suas abordagens de ACCV, apesar da alta relevância ao processo de tomada de decisão de investimento em pavimentos (FHWA, 1995).

A AAPTP (2011) também relatou uma dificuldade de se encontrar publicações sobre os custos indiretos/usuário em ACCV aplicado a SGPA. De fato, na base bibliográfica dessa pesquisa, foram identificados 4 artigos ou revisões contendo ACCV em aeroportos, condensados na Tabela 4. É possível verificar que eles não abordam a inclusão de custos indiretos/usuários em seu escopo ou não os calculam racionalmente.

Tabela 4 – Publicações da base bibliográfica dessa tese versando sobre SGPA e AACV

AUTOR	CUSTOS DIRETOS	CUSTOS INDIRETOS
GRANSBERG (2009)	- <i>Shotblasting</i>	Não considerado
PITTENGER (2011)	- Microrrevestimento	Selecionado da literatura (estimado em US\$ 5000 para compensar atraso na abertura da pista de pouso)
	- Concreto asfáltico (4 cm)	
	- Concreto asfáltico morno (4 cm)	
	- <i>Slurry seal</i>	
	- Capa selante	
IRFAN <i>et al.</i> (2015)	- <i>Shotblasting</i>	Não considerado
	- Preenchimento de juntas, remendo e recapeamento (5 cm)	
	- Substituição de concreto asfáltico em seções quilha (5 cm)	
	- Substituição completa de concreto asfáltico (10 cm)	
TAREFDER (2016)	- Reconstrução completa da pista de pouso	Não considerado
	- Valores de acréscimo de 10, 20, 30 e 40 no PCI (tipos de manutenção e respectivos aumentos de PCI não foram discutidos)	

Esse cenário de raras pesquisas e ferramentas relacionadas à ACCV no gerenciamento de pavimentos aeroportuários é muito diferente daquele apresentado pelo modo rodoviário, onde os softwares HDM (MAZUMDER *et al.*, 2019), REALCOST (CHEN e NI, 2019) e CAL-B/C (JIANG *et al.*, 2012) são exemplos de alternativas consolidadas para auxiliar no cálculo de custos indiretos/usuários. Essas ferramentas utilizam, como base deste cálculo, o Índice Internacional de Rugosidade (IRI – *International Roughness Index*), que aumenta continuamente ao longo do tempo e é geralmente definido como uma função da irregularidade da superfície rodoviária que afeta o funcionamento de um veículo, incluindo velocidade de viagem, economia de combustível, emissões e segurança (ZHANG *et al.*, 2010). Portanto, a irregularidade também impacta na operação do veículo e nos custos de manutenção rodoviária, causando ou agravando patologias no pavimento e afetando a segurança (aquaplanagem) (SAYERS *et al.*, 1986). No entanto, esses custos relacionados ao aumento do consumo de combustível devido à mudança do IRI, em geral, não são computados na ACCV dos pavimentos aeroportuários. KULIKOWSKI (2017) argumenta que essa interação pavimento-veículo, em pistas de aeroportos, pode ser negligenciada devido ao curto período de ocorrência desse fenômeno (aproximadamente 20 minutos antes da decolagem).

No caso particular da utilização do IRI na possível composição dos custos indiretos/usuários em ACCV aplicada a SGPA, não foram encontrados na literatura relatos análogos à situação rodoviária, que atribui um aumento no consumo de combustível dos veículos. Em contrapartida, LOPRENCIPE e ZOCCALI (2019) alertam que uma pista de pouso com irregularidade avançada pode aumentar os custos de sua manutenção e a dos trens de pouso das aeronaves, em função do incremento das cargas dinâmicas e da fadiga dos elementos estruturais das aeronaves. Então os autores mostraram que a medida de BBI (*Boeing Bump Index*), obtida no mesmo método de ensaio para a obtenção do IRI e calculada conforme FAA (2009), obteve uma correlação melhor com a aceleração vertical no *cockpit* da aeronave. Também concluíram que o IRI não apresentou sensibilidade às irregularidades com comprimentos de onda maiores, tornando-o um índice mais conservativo que o BBI.

O método de estimativa dos custos indiretos/usuário em ACCV aplicado em SGPA, fornecido pelo APTP (2011), baseia-se no cálculo da perda diária da receita operacional, que é majorada pelo número de dias necessários para os serviços de M&R,

constituindo a Receita Total Perdida (TLR). Ela é o resultado da estimativa das operações de voo canceladas devido à necessidade de fechamento da pista e integra as seguintes perdas diárias de receita, descritas na Equação 3: Taxa de Instalação de Passageiros (PFC), Taxa Média de Pouso (ALF) e Taxa de Fluxo de Combustível (FFF). No entanto, esse método assume a premissa de que o trabalho é realizado no horário de pico e, por isso, admite que alguns fatores de redução poderiam ser aplicados a obras programadas para horários fora do pico.

$$TLR = D \times [(ALF - ALF') \times DAF + (PR \times PFC) + (FR \times FFF)] \quad (3)$$

Em que:

TLR é a Receita Total Perdida [\$];

D é a duração em dias;

ALF é a Taxa Média de Desembarque antes da intervenção [\$/movimento];

ALF' é a Taxa Média de Desembarque após a intervenção [\$/movimento];

DAF são os voos diários de chegada [movimentos/dia];

PR é a redução de passageiros de embarque [pax/dia];

PFC é a Taxa de Instalação de Passageiros [\$/pax];

FR é a redução de consumo de combustível [gal/dia]; e

FFF é a Taxa de Abastecimento [\$/gal].

Em SGPA, é comum estimar o tempo dos serviços de M&R e de construção preferencialmente em horários fora do pico para calcular sua viabilidade econômica. Esse tempo de interdição adicionado ao nível de manutenção necessário é muito relevante para a gestão operacional das agências (IRFAN *et al.*, 2015). FUSELIER *et al.* (2001) descrevem o uso de um banco de dados com preços de referência e prazos de execução de manutenção previstos para o plano, além de uma descrição do trabalho a ser realizado. Em pontos críticos do aeroporto, como as pistas de pouso e decolagem, onde o serviço de M&R é realizado em intervalos de tempo limitados e predefinidos, a manutenção necessária é definida como "serviço com restrição de tempo". Para outras intervenções, onde há maior flexibilidade e disponibilidade de tempo, a manutenção é considerada

como "serviço sem restrição de tempo". Nesse mesmo sentido, BEJARANO *et al.* (2015) mostraram em um estudo de caso que, após lidar com todos os envolvidos, foi decidido que pelo menos uma pista de pouso e decolagem seria mantida aberta para operações de voo de passageiros e carga durante a semana. Assim, o serviço de M&R ocorreu durante os finais de semana e algumas noites limitadas durante a semana. Essa preocupação em manter o trabalho em períodos fora do pico também é demonstrada pela FAA (2006), que afirma que a execução de obras de pavimentação nesses momentos pode evitar perdas de receitas, atrasos operacionais e outros inconvenientes aos passageiros. Esta agência também recomenda um período mínimo de trabalho de aproximadamente 8 horas em horários fora do pico quando for necessária a utilização de concreto asfáltico, de preferência quando ocorre o menor movimento de aeronaves (geralmente em períodos noturnos). No entanto, períodos de trabalho mais curtos também podem ser admissíveis quando não for possível atender aos recomendados.

3.3 Análise do ciclo de vida em pavimentos

O conceito de análise do ciclo de vida (ACV) vem sendo desenvolvido ao longo de décadas, com a avaliação de balanços de entrada e saída, análise líquida de energia e, em seguida, avaliando processos de produção direta e indiretamente responsáveis pela geração de energia e emissões de resíduos (GREEN e LEPKOWSKI, 2006). A ACV é uma ferramenta estruturada para determinar os tipos e quantidades de impactos gerados ao longo do ciclo de vida de uma cadeia de suprimento, examinando os insumos e as saídas de um produto ou de um sistema (NASCIMENTO *et al.*, 2020). Ela adota uma perspectiva de ciclo de vida para quantificar o consumo de recursos e energia e os resíduos emitidos ao meio ambiente (SHARMA *et al.*, 2011). O quadro de processos, em grande parte, baseia-se na SETAC e na *International Standardization Organization* (ISO) e em sua família de normas 14040 (ISO, 2006). Ele dispõe que a avaliação da sustentabilidade de um produto deve reconhecer o impacto em três dimensões: econômica, ambiental e social. Existem quatro fases sistemáticas em consenso na literatura sobre a ACV (CELAURO *et al.*, 2015; GIANI *et al.*, 2015; HASAN *et al.*, 2019):

- Definição do objetivo e do escopo;
- Compilação do inventário do ciclo de vida (ICV);
- Avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV); e

- Interpretação dos resultados.

A definição do objetivo e escopo envolve a identificação da extensão de um sistema produtivo, incluindo os processos esperados em seu ciclo de vida. Nessa fase são alinhadas algumas características, como: unidade funcional, limites do sistema, categorias de impacto (social, econômico e/ou ambiental) e cenários alternativos. A montagem do ICV consiste na quantificação das informações coletadas sobre as trocas de energia e recursos (fluxos de entrada e saída) com o meio ambiente e as emissões de resíduos ao longo da vida de um sistema produtivo (WHYTE, 2015). A fase de AICV envolve a conversão do inventário em estimativas sistemáticas de impactos ambientais ponderados e avaliados com base em indicadores analíticos. A última fase de interpretação é, na verdade, um processo iterativo na prática, no sentido de retroalimentar as outras três fases da ACV após cada iteração consecutiva do processo de avaliação (HASAN *et al.*, 2019).

Alguns problemas práticos surgem na aplicação do método dentro dessas fases. Na montagem de um ICV, por exemplo, YU *et al.* (2018) notaram que, como os estudos de ACV em pavimentos existentes dependem de diferentes valores de intensidade energética do inventário para calcular o consumo de energia associado à produção de revestimento de concreto de cimento Portland e/ou concreto asfáltico, os valores estimados pela AICV podem sofrer variações significativas. Além disso, a escassez de certos materiais de construção e considerações sobre o esgotamento de recursos locais em uma determinada região, a distância de transporte, as técnicas de mistura, os equipamentos, entre outros, também podem influenciar os cálculos. Algumas ferramentas facilitam a compilação dos dados de inventário, como os *softwares* PaLATE, PE-2, EIO-LCA e SimaPro. Eles são atualmente usados para facilitar todas as quatro etapas de ACV aplicada em pavimento (MUKHERJEE *et al.*, 2013).

No caso específico dos pavimentos, o ciclo de vida é habitualmente dividido nas seguintes etapas (NASCIMENTO *et al.*, 2020):

- Preparação de insumos e seu transporte;
- Fabricação de materiais e seu transporte;
- Construção do pavimento;
- Manutenção e reabilitação;
- Uso; e

- Fim da vida útil.

Essas avaliações são geralmente realizadas nas esferas ambiental, econômica e social. Dependendo do ponto de vista da avaliação, os mesmos insumos (mão-de-obra, materiais, equipamentos e energia) geram diferentes saídas em cada fase do ciclo de vida (HARVEY *et al.*, 2014; NASCIMENTO *et al.*, 2020). Em análise final, esta ferramenta determina o quão prejudicial pode ser a alteração projetada para o meio ambiente (AZARIJAFARI *et al.*, 2015).

Na literatura recente, a aplicação do método pode ser observada nos trabalhos de vários autores, conforme mostrado na Tabela 5. Não há consenso sobre as etapas do ciclo de vida e os indicadores a serem adotados, que dependem do escopo e objetivo de cada situação.

Tabela 5 – Etapas do ciclo de vida e indicadores ambientais examinados em estudos recentes (NASCIMENTO *et al.*, 2020)

AUTOR	FASE DA ACV UTILIZADA						INDICADORES AMBIENTAIS UTILIZADOS										
	Extração/produção de materiais	Transporte de materiais	Construção	Uso	Manutenção	Reciclagem	Gases de efeito estufa (CO ₂ eq)	Consumo de energia	Mudanças climáticas (t CO ₂ eq)	Dióxido de carbono CO ₂	Monóxido de carbono CO	Metano CH ₄	Óxidos de enxofre SO _x	Óxidos de nitrogênio NO _x	Material particulado inalável PM10	Óxido nitroso N ₂ O	Potencial de aquecimento global
GULOTTA <i>et al.</i> , 2019	X	X	X		X	X		X									X
VIDAL <i>et al.</i> , 2013	X	X	X	X	X	X			X								
SANTOS <i>et al.</i> , 2017	X	X	X	X	X	X			X								
HUANG <i>et al.</i> , 2009	X	X	X				X		X				X	X			
REZA <i>et al.</i> , 2013			X		X												
YU e LU, 2014		X	X	X		X			X								
YU <i>et al.</i> , 2013		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
YU e LU, 2012	X	X	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	
ARAÚJO <i>et al.</i> , 2014	X	X	X	X	X	X		X									X

MAURO e GUERRIERI, 2016	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
CHEN <i>et al.</i> , 2016	X		X	X		X			X	X	X	X	X	X			
ANTHONISSEN <i>et al.</i> , 2016															X		
LIU <i>et al.</i> , 2018	X		X				X										
SANTOS <i>et al.</i> , 2015	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
SANTOS <i>et al.</i> , 2015	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
BUTT, 2016	X	X	X				X	X	X		X				X		
CHOU e LEE, 2013	X				X				X	X			X	X			
HONG e PROZZI, 2018	X	X	X	X	X	X	X										
MORETTI <i>et al.</i> , 2017	X	X													X		
LIU <i>et al.</i> , 2015	X	X	X	X	X	X	X										
WANG <i>et al.</i> , 2019	X	X	X	X	X		X		X		X						
Total	17	16	18	13	14	14	4	10	4	11	7	7	7	8	4	3	4

Uma ACV ambiental é responsável por todas as emissões e consumos de recursos tomados em perspectiva de um ciclo de vida, ou seja, desde a extração das matérias-primas, como minérios ou combustíveis fósseis, através da fabricação, distribuição e uso do produto, até sua potencial reciclagem e disposição final, no intuito de quantificar, de maneira abrangente, as performances ambientais dos produtos (FINNVEDEN *et al.*, 2009; HAUSCHILD, 2005). Aplicando modelos científicos de caracterização, o inventário de fluxos elementares entre os processos do ciclo de vida do produto e o ecossistema é traduzido em indicadores que representam os potenciais impactos que o sistema produtivo pode ter sobre o meio ambiente, a saúde humana e os recursos (LAURENT *et al.*, 2012).

A abrangência da ACV compreende uma ampla gama de categorias de impacto, incluindo mudanças climáticas, esgotamento do ozônio estratosférico, acidificação, formação de ozônio fotoquímico que impacta tanto os ecossistemas quanto a saúde humana, eutrofização aquática e terrestre, impactos de substâncias tóxicas em ecossistemas aquáticos e terrestres (ecotoxicidade), impactos de substâncias tóxicas na

saúde humana (toxicidade humana), uso da terra, uso da água e esgotamento de recursos renováveis e não renováveis (LAURENT *et al.*, 2012).

Nesse cenário, a ACV visa fornecer uma medida de impacto ambiental que procura englobar diversos aspectos do meio ambiente. MEA (2005) aborda os impactos antropogênicos nos serviços do ecossistema, que podem ser vistos como dimensões concretas das áreas de proteção da AICV. Uma vez que a modelagem de danos às áreas de proteção na ACV ainda é recente e algumas delas são difíceis de se relacionar com sistemas produtivos de forma significativa, várias das dimensões de serviços do ecossistema não estão representadas no AICV (HAUSCHILD *et al.*, 2013).

Apesar dessas recentes ferramentas, não foram encontradas uma aplicação desses indicadores ambientais em um contexto de tomada de decisão, assim como já relatavam LAURENT *et al.* (2012). Como apresentado na Tabela 5, a maioria dos trabalhos focam seus esforços na quantificação de gases de efeito estufa (GEE), que, além de sua integração total na ACV, foi desenvolvida principalmente embasada no trabalho do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). As questões sobre mudanças climáticas foram abordadas em agendas políticas, o que resultou no desenvolvimento de métodos autônomos de quantificação de GEE (ISO, 2018; WRI e WBCSD, 2005). Comumente conhecidos como métodos de pegada de carbono, essas avaliações aplicam uma perspectiva completa do ciclo de vida e realizam o inventário dos seis GEE indicados no Protocolo de Quioto (IES, 2009; ONU, 1998).

Diversos autores (BERGER e FINKBEINER, 2011; HUIJBREGTS *et al.*, 2010; HUIJBREGTS *et al.*, 2006; LAURENT *et al.*, 2010; LAURENT *et al.*, 2012) criticam a utilização exclusiva da pegada de carbono como indicador ambiental global de uma cadeia produtiva em ACV. Eles demonstram que várias categorias de produtos apresentam uma correlação ruim entre a pegada de carbono e outras categorias de impacto, como os relacionados à toxicidade ou esgotamento de recursos, devido a suas diferentes origens causadas ao longo do ciclo de vida do produto.

3.4 Integração entre ACCV e ACV: uma tomada de decisão

De acordo com HASAN *et al.* (2019), o cenário atual das pesquisas sobre sustentabilidade em pavimentos aponta para o desenvolvimento de uma integração ACCV/ACV para auxiliar o processo de tomada de decisão. Algumas pesquisas

(ANASTASIOU *et al.*, 2015; BISWAS, 2014; BUTT e BIRGISSON, 2016; CELAURO *et al.*, 2017; CHOI *et al.*, 2016; KARLSSON *et al.*, 2017; SANTOS *et al.*, 2015a) utilizaram a fase de M&R em suas ACV e adotaram bases de dados distintas. As análises, portanto, conduziram a resultados quantitativamente diferentes sobre a utilização dos materiais, mas preservaram o método original das quatro fases (objetivo e escopo, inventário do ciclo de vida, análise do impacto do ciclo de vida e interpretação). Apesar de, qualitativamente, todos afirmarem que a inclusão de material reciclado durante as atividades de construção e manutenção reduzem a consumo de energia primária e as emissões de GEE em comparação com a utilização de materiais virgens, não apresentaram uma maneira de integrar ambas as análises na fase anterior da tomada de decisão.

A análise de custo-benefício (ACB) é um método utilizado para auxiliar a tomada de decisão. Ela é utilizada para identificar a alternativa que pode alcançar um objetivo específico com determinado custo (MISHAN e QUAH, 2007). Paralelamente ou em combinação com a ACB, a análise multicritério (AMC) é frequentemente utilizada para avaliar as alternativas com base em um conjunto de critérios mensuráveis (FIGUEIRA *et al.*, 2005). Essas abordagens são amplamente utilizadas nos setores público e privado com um objetivo particular: ajudar os tomadores de decisão a escolher a alternativa mais adequada para alcançar seus objetivos, de acordo com um determinado conjunto de critérios. Entre essas preocupações e critérios, os problemas ambientais não estão bem representados (DONG *et al.*, 2018).

CHESTER e HORVATH (2009) afirmam que não é comum ver uma análise de decisão que abrange um extenso conjunto de impactos ambientais para as alternativas, o que às vezes pode levar a resultados controversos. Por exemplo, ao enfrentar várias alternativas em um projeto de transporte, a melhor alternativa segundo a ACB pode não ter o melhor desempenho ambiental, pois pode ocorrer negligência dos impactos ambientais relativos ao tempo de vida dos veículos e das infraestruturas. Se estes fossem incluídos por meio da perspectiva do ciclo de vida, a alternativa escolhida poderia causar mais danos aos ecossistemas e o custo para alterar tais danos poderia ser maior do que a economia nas infraestruturas. Sem a devida avaliação de impacto ambiental, a tomada de decisão será equivocada.

Segundo DONG *et al.* (2018), a análise de decisão para projetos de transporte é tradicionalmente baseada na ACB. Nesse método, algumas das principais variáveis são a saída de modelos de demanda de transporte, como a economia de tempo de viagem e a

quilometragem percorrida pelos veículos, enquanto outras são derivadas dessa produção, como o número de acidentes, ruídos e emissões ("custos externos").

A ACB em transporte, às vezes, é substituída, combinada ou conduzida em paralelo com a AMC. No entanto, alguns impactos permanecem difíceis de serem quantificados por meio de métodos tradicionais de suporte à decisão de transporte, como os impactos ambientais de longo prazo (ENGELBRECHT, 2009). Os impactos ambientais relacionados a toda a vida útil do projeto, como o uso de recursos, e alguns impactos sobre o ecossistema e a saúde humana não são incluídos. Os projetos da ACB de transporte, em geral, só abordam as emissões de veículos, conforme revisado por ANNEMA *et al.* (2017).

A combinação de análise do ciclo de vida e ACB para auxílio na tomada de decisão pode ser encontrada em alguns estudos. Em JONES *et al.* (2018), dióxido de carbono (CO₂), dióxido de enxofre (SO₂), material particulado inalável, compostos orgânicos voláteis não metano (COVNM) e óxidos nitrosos (NO_x) foram quantificados ao longo do ciclo de vida de um transporte ferroviário, monetizados e integrados à ACB para o cálculo do valor presente líquido (VPL). HUANG *et al.* (2017) conduziram uma análise do ciclo de vida e uma ACB em paralelo para avaliar os impactos ambientais e de custos da reutilização de cinzas volantes; os resultados foram combinados com a utilização de fatores de normalização. Já HOOGMARTENS *et al.* (2014) identificaram os obstáculos para a combinação da ACV e da ACB em termos de discrepâncias no foco de ambos os métodos, no tempo de vida útil, nas etapas escolhidas durante a vida útil, nas métricas e nos limites do sistema.

Uma solução para tentar driblar os óbices advindos da integração ACB e análise do ciclo de vida foi proposta por NASCIMENTO *et al.* (2020) para selecionar tipos de pavimento rodoviário a ser implantado. Para compor uma tomada de decisão composta por componentes econômicos (custo de construção) e ambientais (emissões de gases de efeito estufa e quantidade de energia primária consumida), os autores utilizaram o método *Data Envelopment Analysis* (DEA) e conseguiram selecionar estruturas de pavimento que produziram menos impacto ambiental quando comparadas à abordagem tradicional (custos de construção e vida útil), sem abandonar os critérios financeiros e de custo-benefício. O modelo adotado foi composto pelos resultados econômicos (custo de construção) e ambientais (emissões de gases de efeito estufa e energia primária consumida) como entrada do sistema e a vida útil do pavimento para cada tipo de

pavimento foi a saída Figura 12. Os resultados ainda foram ranqueados em uma avaliação de eficiência cruzada.

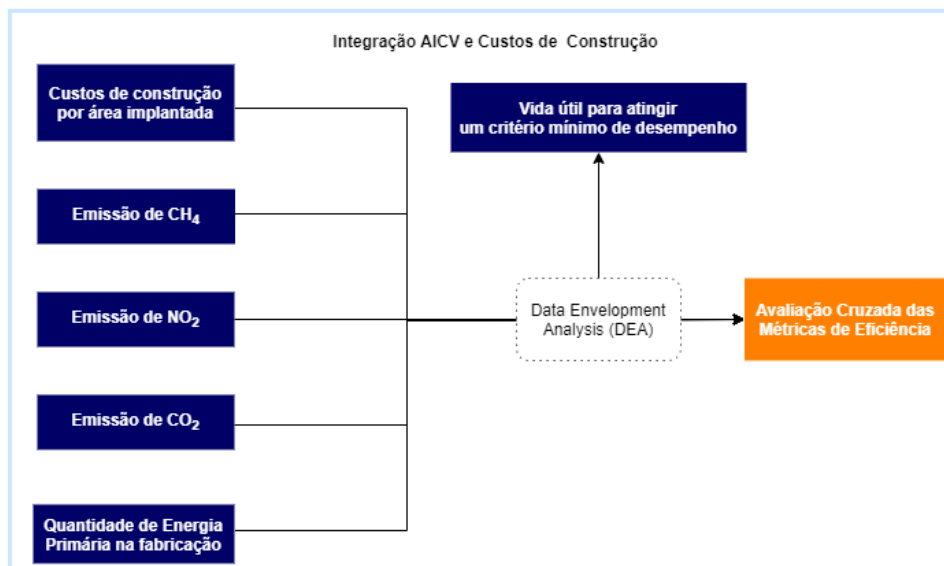


Figura 12 – Modelo de seleção de pavimentos rodoviários em DEA (NASCIMENTO *et al.*, 2020)

Inicialmente formulada por CHARNES *et al.* (1978) para medir a eficiência das unidades produtivas, a DEA é frequentemente utilizada para apoiar a tomada de decisões analisando os insumos e as saídas. Nesta ferramenta, cada unidade produtiva é chamada de *Decision Making Unit* (DMU). Essas unidades são comparativamente avaliadas em pares, de acordo com o número de insumos consumidos e o número de saídas produzidas. Por meio do cálculo de pesos atribuídos às entradas e às saídas do sistema, o método DEA considera que as DMU operam de forma a otimizar seus recursos (ACOSTA *et al.*, 2011).

Comparando as DMU entre si, a DEA identifica aquelas eficientes e ineficientes e estabelece uma fronteira de produção correspondente. Dessa forma, a ferramenta permite identificar quais DMU podem ser consideradas como referências (*benchmarks*) para as menos eficientes. Devido à essa análise minuciosa, a DEA tem sido aplicada em diversas áreas (NASCIMENTO *et al.*, 2020).

Os modelos clássicos em DEA são descritos como CCR ou CRS (*Constant Return to Scale*) e BCC ou VRS (*Variable Return to Scale*). O primeiro considera que os níveis de produção são proporcionais à quantidade de insumos na entrada. Por esse motivo, quando ele é representado graficamente, o modelo CRS apresenta uma superfície linear,

não paramétrica (MELLO et al., 2005). Já o modelo VRS utiliza o axioma da convexidade para não considerar a mesma proporcionalidade entre as entradas e as saídas dos sistemas. Esse modelo, em forma gráfica, apresenta uma superfície convexa em relação às eficiências das DMU. Ambos os modelos podem ser orientados às saídas (obtenção do máximo de produtos para o mesmo nível de insumos) ou às entradas (minimizar a quantidade de insumos para determinado nível de produção) (BERTOLOTO e MELLO, 2011; MELLO et al., 2005; MILANI et al., 2015).

O modelo CRS atribui valor dos pesos u_j e v_i , (importância relativa das variáveis), conforme Equação 4. Eles maximizam a soma ponderada das saídas do sistema em relação a soma ponderada das entradas do sistema. O modelo é restrito a um resultado menor que a unidade para essa divisão. Se o denominador da função objetivo for igualado à unidade, o problema transforma-se em uma programação linear, conforme Equação 5 (LINS e MEZA, 2000). No modo apresentado, as formulações estão orientadas às entradas. Para orientá-las às saídas, basta inverter o quociente do modelo (GUEDES *et al.*, 2008).

$$Max h_0 = \frac{\sum_{j=1}^s u_j y_{j0}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{j0}}$$

Sujeito a:

$$\frac{\sum_{j=1}^s u_j y_{jk}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{jk}} \leq 1 \quad k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

$$u_j \geq 0, \quad \forall j,$$

$$v_i \geq 0, \quad \forall i,$$

Em que:

K é a quantidade de DMU

i é a quantidade de entradas de cada DMU

j é a quantidade de saídas de cada DMU

h_0 é a eficiência da DMU

y_{j0} é o valor da saída j da DMU

x_{i0} é o valor da entrada i da DMU

u_j é o vetor peso atribuído à saída j

v_i é o vetor peso atribuído à entrada i

$$\text{Max } h_0 = \sum_{j=1}^s u_j y_{j0}$$

Sujeito a:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^m v_i x_{i0} &= 1 \\ \sum_{j=1}^s u_j y_{jk} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ik} &\leq 0 \quad k = 1, 2, 3, \dots, n \\ u_j, v_i &\geq 0, \quad \forall x, y \end{aligned} \tag{5}$$

O nome do método DEA é influenciado pelo Modelo do Envelope, que se obtém a partir do problema dual oriundo dos problemas primais apresentados. A Equação 6 apresenta essa nova forma de enxergar o problema, sob a orientação das saídas.

$$\text{Max } h$$

Sujeito a:

$$\begin{aligned} -hy_{j0} + \sum_{k=1}^n \lambda_k y_{jk} &\geq 0, \quad j = 1, \dots, s \\ x_{i0} + \sum_{k=1}^n x_{ik} \lambda_k &\geq 0, \quad i = 1, \dots, r \\ \lambda_k &\geq 0, \forall k \quad h \geq 0 \end{aligned} \tag{6}$$

O modelo VRS é uma variação do modelo CRS, onde se buscou incluir uma nova restrição de convexidade ao Modelo do Envelope. Dessa maneira, sem a proporcionalidade entre insumos e produtos, ele consegue modelar os casos de rendimentos crescentes e decrescentes de escala na fronteira. A Equação 7 e a Equação 8

mostram o problema dual do modelo VRS orientado às entradas e às saídas do sistema, nas quais é possível identificar as variáveis u_* e v_* que, associadas à condição $\sum_{k=1}^n \lambda_k = 1$, são identificadas como fatores de escala.

$$\text{Max } h_0 = \sum_{j=1}^s u_j y_{j0} + u_*$$

Sujeito a:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^r x_{i0} v_i &= 1 \\ - \sum_{j=1}^s y_{jk} u_j + \sum_{i=1}^r x_{ik} v_i + u_* &\leq 0, \quad \forall k \\ v_i, u_j &\geq 0, u_* \in \mathfrak{R} \end{aligned} \tag{7}$$

$$\text{Min } h_0 = \sum_{j=1}^r x_{i0} v_i + v_*$$

Sujeito a:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^s y_{j0} u_j &= 1 \\ - \sum_{i=1}^r x_{ik} v_i + \sum_{j=1}^s y_{jk} u_j - v_* &\leq 0, \quad \forall k \\ v_i, u_j &\geq 0, v_* \in \mathfrak{R} \end{aligned} \tag{8}$$

Diversos estudos têm aplicado a DEA no contexto de tomada de decisão e análise da eficiência no setor de transportes. Os pesquisadores geralmente utilizam métricas operacionais (carga ou passageiros transportados, veículo-km diário) como saídas do processo, enquanto estas são misturadas com outras características do ambiente de transporte (tempo de viagem, percepção de conforto dos passageiros, disponibilidade de veículos, número de paradas) para definir os insumos do sistema (HAWAS *et al.*, 2012; SWAMI e PARIDA, 2015). Em algumas ocasiões, estudos utilizando a DEA aplicada ao transporte incluíram, além de fatores operacionais, alguns aspectos de informações geográficas como insumos (LAO e LIU, 2009) ou avaliaram a eficiência das estratégias

para investir em infraestrutura de transporte (BERTOMÉU-SÁNCHEZ e ESTACHE, 2017). De qualquer forma, o principal desafio da incorporação da DEA no setor de transportes parece ser a modelagem do problema, com a seleção das DMU e a definição das variáveis de entrada e saída, de acordo com o escopo e o objetivo de cada análise (NASCIMENTO *et al.*, 2020).

Apesar das vantagens substanciais, existem alguns problemas a serem superados ao utilizar a DEA no contexto de transporte, uma vez que essa modelagem pode não se encaixar totalmente com os processos de fabricação. O uso de variáveis ambientais, comuns a diferentes tipos de materiais, pode trazer consequências inesperadas para o modelo. O método DEA avalia cada DMU atribuindo pesos, beneficiando os pontos fortes (saídas com maiores níveis de produção e insumos com menores níveis de consumo) e penalizando os pontos fracos (insumos com altos níveis de consumo e saídas com baixos níveis de produção) (NASCIMENTO *et al.*, 2020).

Para evitar essas discrepâncias, SEXTON *et al.* (1986) desenvolveram uma avaliação de eficiência cruzada, onde a eficiência média de uma DMU é calculada do ponto de vista da outra DMU. Isso acontece quando os pesos ideais (soluções ideais) da DMU avaliam o peso das saídas e entradas das outras DMU. A Equação 9 mostra esse equilíbrio dos pesos, entradas e saídas ideais do processo entre as DMU.

$$E_{ks} = \frac{\sum_i^{outputs} u_{ik} y_{is}}{\sum_j^{inputs} v_{jk} x_{js}} \quad (9)$$

Em que:

E_{ks} é o quociente de eficiência da DMU k em relação às DMU s ; e

u_{ik} e v_{jk} são os pesos ideais (soluções ideais) da DMU k , que respectivamente pesam as saídas y_{is} e as entradas x_{js} da DMU s .

Nesse método de eficiência cruzada, a DEA abandona a visão exclusiva da autoavaliação das DMU e as classifica por meio de avaliação entre seus pares. Segundo DOYLE e GREEN (1994), o método de eficiência cruzada tem a vantagem de eliminar pesos irrealistas calculados por algum cenário, sem ter que recorrer a restrições de peso

organizadas por especialistas. Além disso, o método consegue ranquear a DMU analisada de uma maneira relativa, cada uma de acordo com as demais.

Aplicando a Equação 9, cada DMU k terá então uma quantidade de E_{ks} igual ao número de DMU em questão. ZHU (2014) relata que, em geral, a eficiência cruzada de uma DMU k é a média de seus E_{ks} , de acordo com a Equação 10. Estes diferentes E_{ks} e suas médias (eficiências cruzadas) são ilustrados na Tabela 6.

$$\overline{E}_k = \frac{1}{n} \sum_{s=1}^n E_{ks} \quad (10)$$

Em que:

\overline{E}_k é a eficiência cruzada da DMU k ; e

n é o número de DMU.

Tabela 6 – Exemplo de uma matriz de eficiência cruzada (DOYLE e GREEN, 1994)

DMU avaliadora	DMU avaliada						Avaliação média dos pares
	1	2	3	4	5	6	
1	E_{11}	E_{12}	E_{13}	E_{14}	E_{15}	E_{16}	A_1
2	E_{21}	E_{22}	E_{23}	E_{24}	E_{25}	E_{26}	A_2
3	E_{31}	E_{32}	E_{33}	E_{34}	E_{35}	E_{36}	A_3
4	E_{41}	E_{42}	E_{43}	E_{44}	E_{45}	E_{46}	A_4
5	E_{51}	E_{52}	E_{53}	E_{54}	E_{55}	E_{56}	A_5
6	E_{61}	E_{62}	E_{63}	E_{64}	E_{65}	E_{66}	A_6
	\overline{E}_1	\overline{E}_2	\overline{E}_3	\overline{E}_4	\overline{E}_5	\overline{E}_6	

Avaliação média por pares (avaliação por pares)

A flexibilidade dos modelos DEA também permite a avaliação das fronteiras invertidas. Trata-se da construção de uma fronteira ineficiente, que passa pelas DMU com as piores práticas. Esse processo de medição das ineficiências é alcançado quando se troca as entradas com as saídas dos modelos clássicos (YAMADA *et al.*, 1994). SOARES DE MELLO, *et al.* (2008) descreve uma análise por meio da utilização de ambas as medidas de eficiência e ineficiência, denominada eficiência composta. Para tal, basta empregar a

média aritmética entre a eficiência em relação à fronteira original (eficiência padrão) e a ineficiência em relação à fronteira invertida ($1 - \text{eficiência invertida}$). Assim, uma DMU que apresente bom desempenho na fronteira padrão e não apresente bom desempenho na fronteira invertida, terá um elevado índice em sua eficiência composta.

Os dados, no entanto, devem ser preparados para compor o modelo baseado em DEA. As etapas de preparação são compostas por: seleção das entradas e saídas do sistema; seleção do número de DMU; balanceamento da magnitude dos dados (normalização) e tratamento dos valores ausentes, negativos e zeros (SARKIS, 2007).

Para a seleção das variáveis que irão compor o modelo baseado em DEA, ABREU *et al.* (2005) utilizaram os modelos publicados por ESTELLITA LINS e MOREIRA (2000) e MELLO *et al.* (2003). Eles propuseram uma alteração no modelo original que calculava todos os pares entrada-saída iniciais e selecionava aquele com maior eficiência média, sintetizada pela sigla S_{EF} , e menor quantidade de DMU na fronteira, cuja sigla é S_{DIS} . Em seguida, as outras variáveis eram incorporadas, uma a uma, até que fosse obtido o cenário com maior eficiência média e máxima discriminação das DMU. A modificação foi atribuir valor 1 para o maior valor de eficiência e 0 para o menor valor no S_{EF} e atribuir valor 0 para o conjunto de variáveis que gera maior número de DMU eficientes e 1 para o menor número no S_{DIS} . A variável S é a média aritmética entre os dois índices anteriores. A Figura 13 mostra esse processo de escolha.

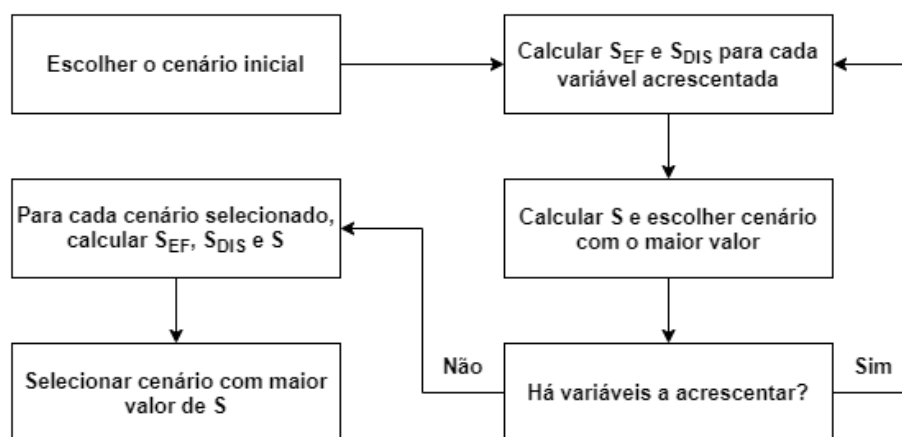


Figura 13 – Algoritmo de seleção de variáveis proposto por ABREU *et al.* (2005)

Por mais que as variáveis sejam bem selecionadas, FRIEDMAN e SINUANY-STERN (1998) defendem empiricamente que o número de variáveis a compor o processo

deve ser no máximo 1/3 do número de DMU. O argumento para essa regra é que a homogeneidade do conjunto de dados pode diminuir, o que significa que alguns impactos exógenos sem interesse para o analista ou fora do controle do gestor podem afetar os resultados (SARKIS, 2007). Então, TRAN *et al.* (2010) desenvolveram um método simplificado para detectar possíveis *outliers* (valores extremos) no DEA. A partir da matriz M_λ (Equação 11) formada pelos vetores de peso λ das entradas e das saídas de um processo com j DMU, os autores interpretaram que cada peso não zero representa uma ocasião em que uma observação aparece durante a construção do DEA. O número total de ocorrências C_j é indicado pelo número de vezes que um valor não zero de λ aparece na coluna correspondente dos valores λ (Equação 12). Também, é possível calcular o peso cumulativo de uma observação em todos os conjuntos eficientes, por meio da soma da coluna de todos os pesos para uma única observação S_j (Equação 13). Com base nos valores de C_j e S_j , pode-se identificar observações no conjunto de dados que exercem uma relevante influência na construção da fronteira eficiente. Essas observações são *outliers* em potencial. Retira-se essa DMU da análise e as verificações continuam dentro de um processo iterativo, até que ocorra uma convergência dos valores C_j e S_j .

$$M_\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{1j} \\ \lambda_{21} & \dots & \lambda_{2j} \\ \lambda_{j1} & \lambda_{j2} & \lambda_{jj} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$C_j = \sum_{j \text{ se } \lambda_{ij} > 0} 1 \quad (12)$$

$$S_j = \sum_j \lambda_{ji} \quad (13)$$

Em que:

M_λ é a matriz dos pesos λ das j DMU;

C_j é a contagem de valores não zeros da coluna j da matriz M_λ ; e

S_j é a soma dos pesos da coluna j da matriz M_λ .

O próximo passo é realizar o balanceamento das magnitudes dos dados, para evitar possíveis vieses nos resultados em função de uma grosseira discrepância entre os valores de entrada e saída. SARKIS (2007) sugere a adoção da normalização média para essa finalidade, conforme Equação 14.

$$\bar{V}_i = \frac{\sum_{n=1}^N V_{ni}}{N} \quad (14)$$

Em que:

\bar{V}_i é o valor médio para a coluna i (entrada ou saída);

N é o número de DMU; e

V_{ni} é o valor da DMU n para uma dada entrada ou saída i.

Em relação aos valores ausentes, negativos ou zeros na base de dados, esse assunto torna-se relevante quando da sua possível aplicação em SGPA, pois um dos cenários que serve como base comparativa é o “fazer nada”. Sabe-se que o DEA possui uma exigência de “positividade”, ou seja, para os modelos básicos, os números devem ser não negativos e, preferencialmente, maiores que zero. No entanto, IQBAL ALI e SEIFORD (1990) relataram a propriedade de invariância de translação em alguns casos específicos de DEA. Essa situação é consolidada quando se adiciona constantes positivas aos valores não positivos, para que eles percam essa condição (SARKIS, 2007). Uma maneira de garantir que a variância de translação não impacte a solução é usar um tipo específico de modelo DEA. IQBAL ALI e SEIFORD (1990) e PASTOR (1996) mostraram que um deslocamento não altera a fronteira eficiente no modelo aditivo orientado à entradas e saídas. No modelo VRS, quando for orientado às entradas, não haverá alteração na fronteira com o deslocamento das suas saídas; caso for orientado às saídas, o mesmo é válido para as entradas. Esses modelos, portanto, são invariantes de translação. Assim, constantes positivas podem ser adicionadas a qualquer entrada e saída no modelo aditivo e a qualquer entrada (saída) no modelo VRS orientado à saída (entrada), a fim de resolver a questão de problemas negativos ou de valor zero. Esses valores de translação, quando necessários, devem ser igualmente adicionados a todas as DMU (SARKIS, 2007).

3.5 Considerações finais do capítulo

A ACCV já é integrada a SGPA em algumas agências estudadas. O método mostra-se plenamente capaz de integrar-se ao modelo proposto pela tese. Dentre as etapas revisadas desse método, observou-se que o desenvolvimento de estratégias de alternativas, o cálculo dos custos diretos e a montagem do fluxo de caixa estão consolidadas na literatura. Porém os custos indiretos ainda merecem maiores aprofundamentos, principalmente no meio aeroportuário. Como a aeronave trafega por curtos períodos de tempo no pavimento, a adoção automática da abordagem rodoviária (cálculo do acréscimo de combustível aos usuários em função do aumento da irregularidade longitudinal) não parece viável. O BBI, poderia cumprir essa função para estimar os custos com manutenção da aeronave e do pavimento. Entretanto, não foram encontrados dados monetários práticos sobre essa correlação.

A literatura explorada revelou apenas um método racional para o cálculo dos custos indiretos em ACCV em SGPA. Ela é fundamentada, no entanto, na perda de receita oriunda exclusivamente de taxas aeroportuárias. Nesse mesmo tema, o horário escolhido para a interdição da pista de pouso em virtude da necessidade de sua manutenção parece exercer influência sobre a movimentação do aeroporto e, conseqüentemente, em suas receitas também. Porém, esse fato ocorre somente quando o aeroporto ultrapassa a sua capacidade operacional em função desse evento.

Na ACV parece repousar uma grande contribuição ao método proposto pela tese. Ela guarda, em sua essência, o mesmo conceito da ACCV, que já é incorporada em muitos SGP. Como óbices à essa incorporação, porém, estão relatados a falta de padronização dos escopos e a carência nas bases de dados ambientais (inventários). Esse é um tema relativamente novo nas pesquisas em transportes, segundo as publicações revisadas, e quando aplicada em projetos, surge em fases posteriores às ferramentas suporte à tomada de decisão. Também foram observadas algumas críticas quanto à avaliação isolada das emissões de dióxido de carbono ou seus impactos diretamente relacionados, apesar de ser o cálculo mais difundido e aplicado pelas indústrias.

O método DEA parece possuir os requisitos suficientes para cumprir a função de incorporar os impactos ambientais relevantes oriundos da fase de AICV. Mesmo com procedimentos longos para o pré-tratamento dos dados iniciais, ele se diferencia das outras análises multicritério em função da sua característica de atribuição dos pesos em

problema de programação linear, abstendo-se da necessidade de intervenção do operador para tal finalidade. O modelo DEA VRS orientado às saídas mostra-se com potencial de aplicação no modelo proposto na tese, pois consegue lidar com o problema dos dados não positivos que, certamente, serão advindos do cenário “não fazer nada” das políticas de M&R.

4 PROPOSTA DE PROCEDIMENTO METODOLÓGICO PARA UM SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS

4.1 Considerações iniciais

Em conformidade com os objetivos propostos por essa tese e buscando preencher algumas lacunas observadas na revisão da literatura, elaborou-se um procedimento metodológico incorporando conceitos da análise de custo do ciclo de vida (ACCV) e da análise do ciclo de vida (ACV), com foco na aplicação nacional. Buscou-se, no entanto, manter as boas práticas observadas, sobretudo nas avaliações estruturais e funcionais do pavimento, referente às obras e serviços atinentes à engenharia civil.

Neste contexto, o procedimento proposto é composto por cinco grandes etapas, que, por sua vez, subdividem-se em fases menores e serão exploradas separadamente para efeitos didáticos. As grandes etapas são:

- Projeções Estruturais;
- Projeções Operacionais;
- Análise de Custo do Ciclo de Vida;
- Análise do Ciclo de Vida; e
- Sistema de Suporte à Decisão.

A visão geral do procedimento proposto encontra-se ilustrado na Figura 14. Pode-se observar todas as conexões internas e externas das fases, bem como seus subprodutos as contribuições propostas por essa tese, conforme legenda.

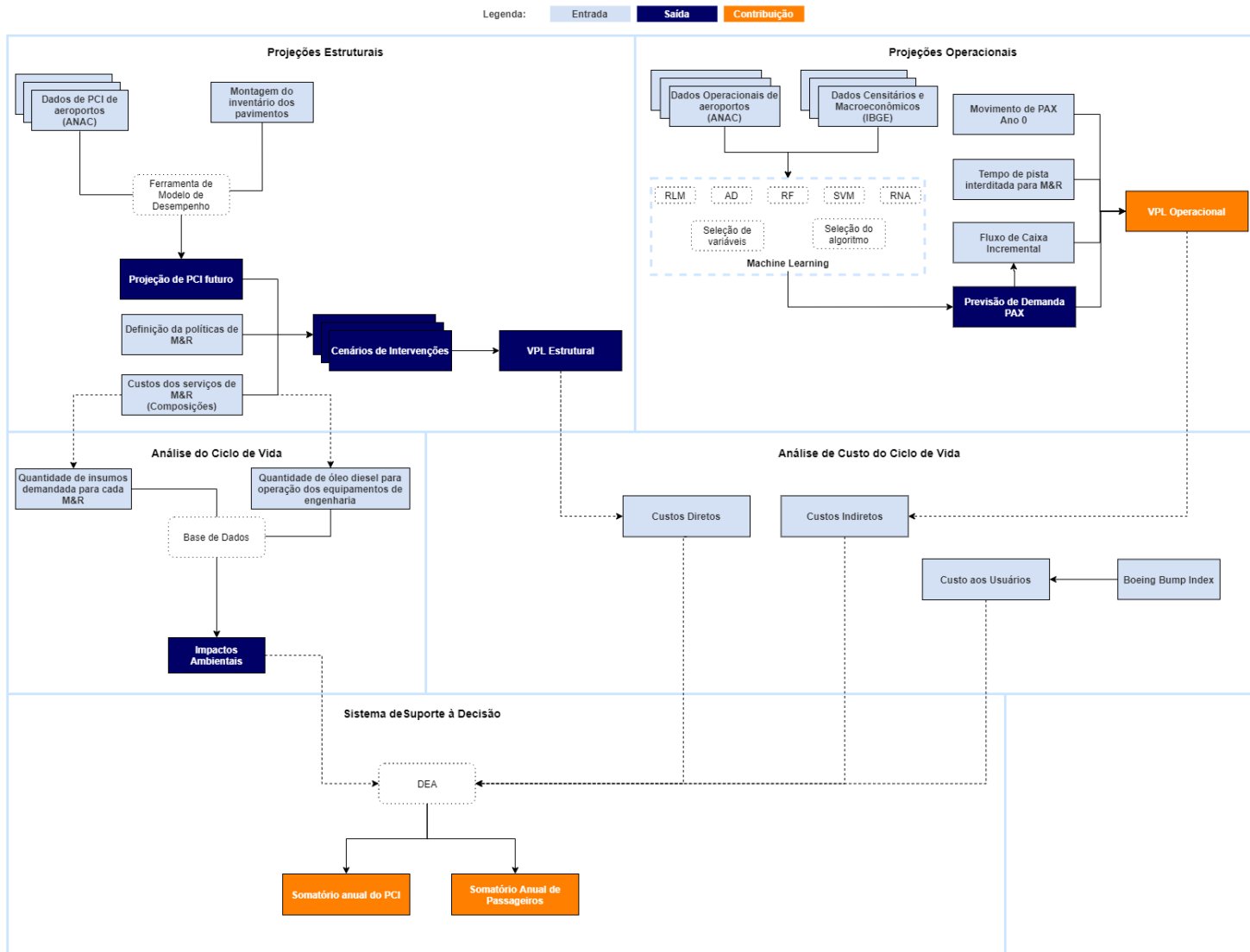


Figura 14 – Proposta de procedimento metodológico elaborado por essa tese

4.2 Descrição das cinco grandes etapas do SGPA proposto

4.2.1 Projeções Estruturais

O objetivo final dessa grande etapa é conceber um fluxo de caixa com o custo direto das ações de M&R futuras, do qual se extrai um valor presente líquido (VPL), aplicando a Equação (2). Para fins de simplificação, esse valor foi denominado VPL Estrutural. Para melhor visualização, a Figura 15 destaca essas fases para as projeções estruturais.

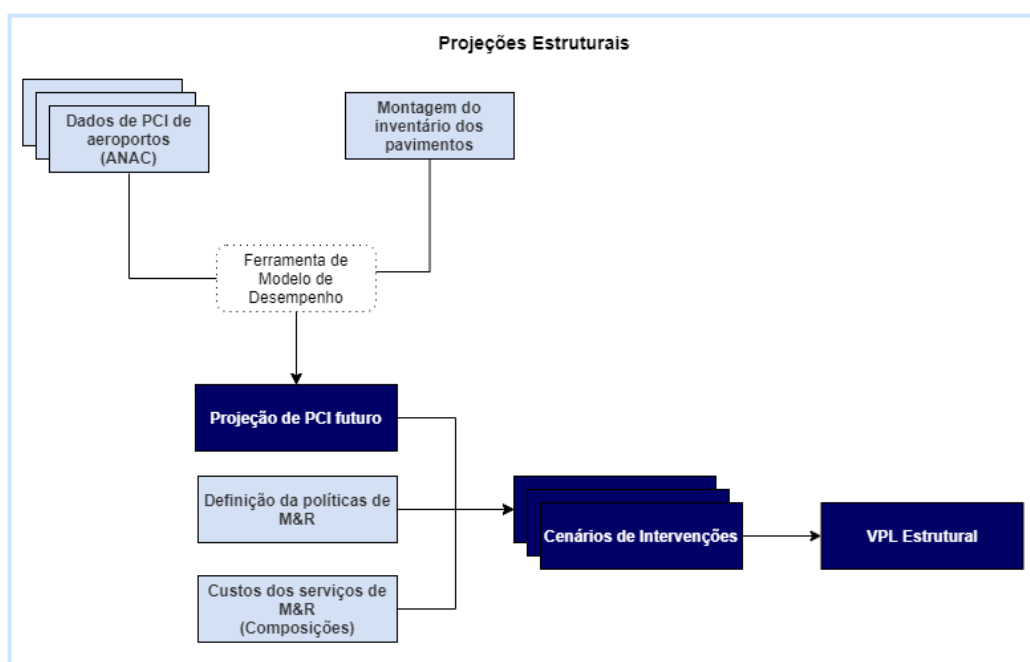


Figura 15 – Procedimento para a etapa de Projeções Estruturais do método proposto

A etapa de Projeções Estruturais inicia-se com a montagem do inventário dos pavimentos, conforme já determinado por ANAC (2017), coletando os seguintes dados: localização e identificação da rede, classe do pavimento, geometria (transversal e longitudinal), materiais e espessuras das camadas, histórico da construção e das intervenções de M&R, condição dos sistemas de drenagem e da sinalização e sistema referencial.

Em paralelo, as condições do pavimento são investigadas por meio dos ensaios para avaliação estrutural, funcional e de segurança. São necessários os seguintes ensaios

no nível estrutural: índice de suporte Califórnia, módulo de resiliência ou elasticidade, avaliação das tensões e deformações limites, deflectometria (*Falling Weight Deflectometer*), avaliação das espessuras e materiais das camadas do pavimento (*Ground Penetration Radar*), sondagens (abertura de janelas de inspeção e coleta de materiais) e capacidade de suporte (*Dynamic Cone Penetrometer*). Em nível funcional, a avaliação é consolidada pelo cálculo do *Pavement Condition Index* (PCI) e pelos ensaios para obtenção do *International Roughness Index* (IRI) e do *Boeing Bump Index* (BBI). O ensaio de PCI já prevê a segmentação do pavimento em áreas que, idealmente, apresentarão o mesmo desempenho e possuem a mesma função (segmentos homogêneos). A avaliação de segurança é realizada com os equipamentos previstos pela Resolução nº 236/2012 (ANAC, 2012), com especial deferência ao *Mu-meter*. A ideia dessa fase é identificar, de antemão, potenciais problemas estruturais ou de segurança, independente das análises posteriores com o PCI. Esses possuem prioridade na escolha das técnicas de M&R.

Com os dados de PCI, recomenda-se a utilização de uma ferramenta computacional que seja capaz de auxiliar o cálculo do da condição atual e futura do pavimento (projeção do PCI futuro). Recomenda-se o cadastro do inventário e dos dados das avaliações nos *softwares PAVER* ou *FAA PAVEAIR*, ambos recomendados pela FAA (2014a), que utilizam modelos de previsão de desempenho baseados em famílias de curvas, construída com uma base de dados históricos dos pavimentos monitorados pela agência.

O operador do aeródromo deve estabelecer políticas de intervenção do seu pavimento, baseado na sua realidade local. A Tabela 1, criada por BATISTA (2015) é uma sugestão para adoção nessa fase, já que sua pesquisa desfruta das condições dos pavimentos nacionais. Nessa fase, são compostos os cenários de M&R para uma determinada rede de pavimentos, discretizada por segmentos homogêneos. Para a montagem desses cenários, esse método propõe o estabelecimento de, pelo menos, três situações compostas por PCI mínimos:

- Cenário 1: PCI mínimo = 70;
- Cenário 2: PCI mínimo = 55; e
- Cenário 3: PCI mínimo = 85.

A proposição desses cenários se dá por inspiração da Figura 7, na escala customizada de PCI. Cada segmento homogêneo, em cada cenário, comporá uma DMU (*Decision Making Unit*) da última etapa do método, que serão comparadas entre si. Cada DMU terá um desempenho diferente, com custos desiguais e impactos ambientais diversos.

Os custos unitários dos serviços de M&R podem ser calculados a partir de uma base histórica do próprio local ou por contratos já em vigor. Em última instância, pode-se utilizar bancos de dados de referência dos custos unitários. Os custos obtidos nesta fase devem ser padronizados por unidade de área mantida ou reabilitada. Para cada atividade de M&R, deve-se somar os custos unitários dos serviços dessa atividade, por área de pavimento, resultando no custo unitário da atividade. Aplicando, então, esses custos unitários em um fluxo de caixa coincidente com as datas dos cenários estabelecidos, chega-se ao VPL Estrutural. Esse valor calculado para cada DMU (por segmento homogêneo e por cenário) irá compor, integralmente, os custos diretos da etapa de ACCV.

4.2.2 Projeções Operacionais

A finalidade dessa grande etapa é a obtenção do VPL Operacional, que expressa a redução de movimento do aeroporto de uma maneira mais abrangente, sem recorrer apenas a perda de receita das taxas aeroportuárias.

Essa grande etapa de Projeções Operacionais propõe um método de cálculo de custos indiretos na ACCV, advindo do chamado VPL Operacional. A Figura 16 mostra todas as fases necessárias para atingir essa finalidade.

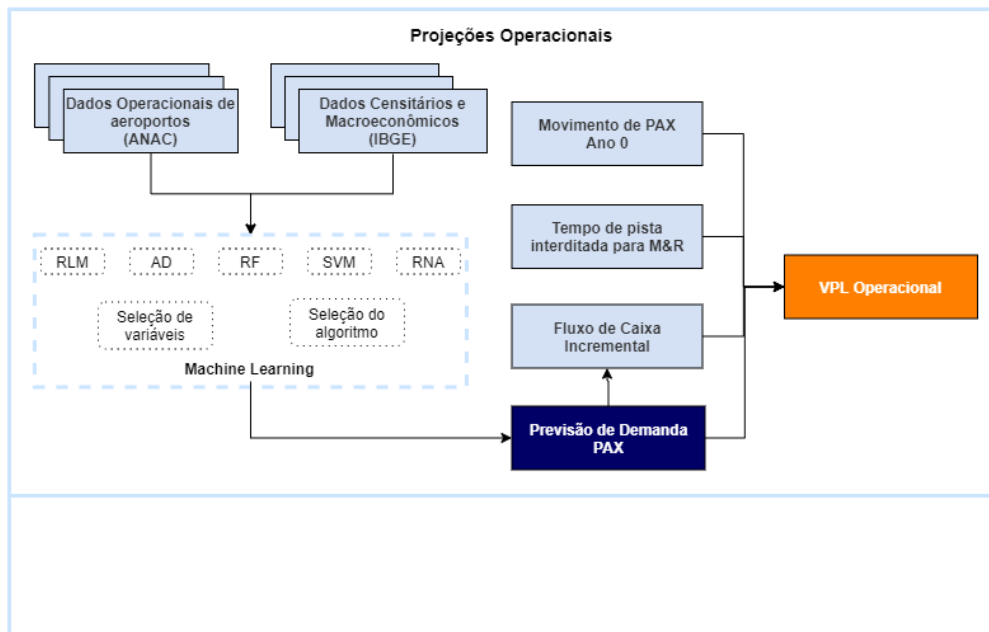


Figura 16 – Procedimento para a etapa de Projeções Operacionais do método proposto

O VPL Operacional está associado à perda de receita operacional, sintetizado pela redução da movimentação de passageiros e causado pelo tempo de interdição da pista para procedimentos de M&R. Embora a APTP (2011) e a FAA (2014a) já sugeriram uma solução com valores históricos médios ou estimados, acredita-se que a incorporação de técnicas de previsão de passageiros baseadas em inteligência artificial pode oferecer uma alternativa para o cálculo composto de métricas mais racionais, como erro médio absoluto e intervalo de confiança. Este modelo poderia ser capaz de prever o mês mais favorável para os serviços de M&R, com um movimento menor de passageiros, utilizando os períodos fora do pico. O estudo assume a premissa de que as receitas aeroportuárias podem ser expressas em termos de movimentação de passageiros, uma vez que alguns autores (FERNANDES e PACHECO, 2016; RODRIGUE, 2020) relatam que a participação da carga aérea na receita das companhias aéreas é geralmente inferior a 5%. Nos aeroportos, a maior parte da receita também está relacionada à movimentação de passageiros, ou seja, às receitas comerciais e receitas de embarque/conexão.

A aplicação do método proposto limita-se aos aeroportos cuja capacidade deverá ser excedida para um determinado cenário de M&R, como descrito pela APTP (2011). Essa conjuntura abrange várias situações reais, como quando há necessidade de atividades de M&R nas partes centrais da pista de pouso única ou quando não é possível mover a cabeceira da pista por razões de segurança. A ANAC (2020a), por exemplo, impõe uma

série de verificações de segurança a serem observadas pelo operador aeroportuário antes de encurtar a pista, como sinalização específica, previsão de área de segurança (RESA), instalação de *blast fence* em casos específicos, verificação dos efeitos sobre equipamentos de auxílio à navegação, entre outros.

Para o cálculo do VPL Operacional, sugere-se a utilização das seguintes fases observadas na literatura:

- Coleta de dados operacionais e censitários, divulgados respectivamente pelo regulador (ANAC, 2019) e pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2018);
- Modelagem da demanda de passageiros anuais e mensais no aeroporto em questão, usando as técnicas de regressão linear múltipla (RLM) (R CORE TEAM, 2019), árvore de decisão (AD) (THERNEAU e ATKINSON, 2019), *random forest* (RF) (LIAW e WIENER, 2002), *support vector machines* (SVM) (MEYER *et al.*, 2019) e redes neurais artificiais (RNA) (LEDELL, 2019);
- Classificação dos algoritmos, utilizando a média de 10 medidas dos coeficientes de determinação dos grupos de treinamento e teste e erro absoluto médio, obtido por validação cruzada de séries temporais em 10 etapas (BERGMEIR e BENÍTEZ, 2012).

Os dados operacionais dos aeródromos divulgados pela ANAC e os dados censitários publicados pelo IBGE fornecem informações relevantes e que facilitam a aplicação das técnicas descritas de aprendizado de máquina. Alguns trabalhos já mostraram a aplicação dessas técnicas em séries temporais (GUPTA *et al.*, 2019; SUN *et al.*, 2019; YANG *et al.*, 2017).

Com a estimativa anual e mensal de passageiros, realiza-se um fluxo de caixa incremental, obtido pela diferença entre o fluxo de caixa sem qualquer intervenção e o fluxo de caixa com a intervenção prevista para aquele cenário. A redução de passageiros no ano i é estimada pela movimentação horária de passageiros no mês menos movimentado do ano i e pelo tempo necessário de interdição da pista de pouso no mesmo ano i , conforme Equação 15. Esse tempo de interdição é acumulado, ano a ano, e é considerado o maior valor de tempo de execução de serviços de M&R, dentre todos os segmentos homogêneos pertencentes à mesma pista. Entende-se que o maior tempo de

interdição para a realização de um serviço em determinado segmento homogêneo será suficiente para a realização dos serviços de menor tempo de execução dos outros segmentos, sob o regime de múltiplas equipes de trabalho.

$$P_{pax}^i = MHP_i \times TIP_i \quad (15)$$

Em que:

P_{pax}^i é a perda de passageiros no ano i;

MHP é a movimentação horária de passageiros (pax do mês / número de horas do mês) do ano i; e

TIP é o tempo de interdição de pista no ano i, em horas, tomado como o maior valor de tempo de execução de M&R, entre todos os segmentos homogêneos.

A Equação 15 é aplicada quando a política de intervenção adotada pelo aeroporto exigir a execução dos serviços de M&R em regime integral. Quando houver a possibilidade da utilização apenas dos períodos fora do pico, propõe-se a utilização da Equação 16. As variáveis C e TIN expressam os conceitos da utilização dos horários fora de pico observados na literatura sobre a execução de serviços de M&R em pavimentos aeroportuários. Eles capturam a menor porcentagem acumulada de movimento de passageiros por hora dentro de uma janela de tempo para intervenção planejada. Esse período de interdição da pista é notificado às empresas aéreas por meio do documento NOTAM (*Notice to Airmen*). A constante (24) apenas transforma a variável MHP em um movimento diário, visando uma adequação com a variável TIN (horas de interdição por dia).

$$P_{pax}^i = MHP_i \times TIP_i \times \frac{24 \times C}{TIN} \quad (16)$$

Em que:

C é o mínimo $\left(\frac{\sum_{j=1}^{TIN} MHP_{i,j}}{\sum_{j=1}^{24} MHP_{i,j}} \right)$, representando o percentual mínimo acumulado de movimentação de passageiros por hora dentro do TIN, no mês menos movimentado do ano i;

TIN é o tempo diário de interdição da pista de pouso e decolagem, previamente planejado e notificado via NOTAM.

Conhecendo-se a receita operacional líquida (receita bruta reduzida dos impostos) do aeroporto e as despesas operacionais, obtidas na Demonstração do Resultado do Exercício (DRE) do operador, pode-se inferir os valores por passageiro, a partir do ano base (ano do DRE e da montagem do plano de M&R). Assim, as flutuações de passageiros ocasionadas pelas perdas calculadas nas Equações 15 ou 16 também refletirão nos lucros operacionais brutos de cada ano do plano. Esse lucro é resultado da diferença entre a receita operacional líquida e as despesas operacionais.

Por fim, o VPL Operacional encaminha-se para compor os custos indiretos da próxima grande etapa de ACCV. Esse VPL é decorrente dos valores de fluxo de caixa incremental anteriormente apresentado.

4.2.3 Análise de Custo do Ciclo de Vida

A grande etapa de análise de custo do ciclo de vida (ACCV) foi didaticamente inserida ao modelo. Ela é resultante, na verdade, dos resultados das grandes etapas de Projeções Estruturais e de Projeções Operacionais. Os valores finais encontrados nessas etapas (VPL) compõem os custos diretos e os custos indiretos, respectivamente. A Figura 17 ilustra o procedimento dessa etapa. Em função das informações sobre BBI levantadas na revisão da literatura, esse índice foi admitido, artificialmente, como custo aos usuários, em função dos potenciais valores adicionais de manutenção no pavimento e na estrutura da aeronave. Esses três custos (diretos, indiretos e usuários) seguirão como dados de entrada para a modelagem DEA.

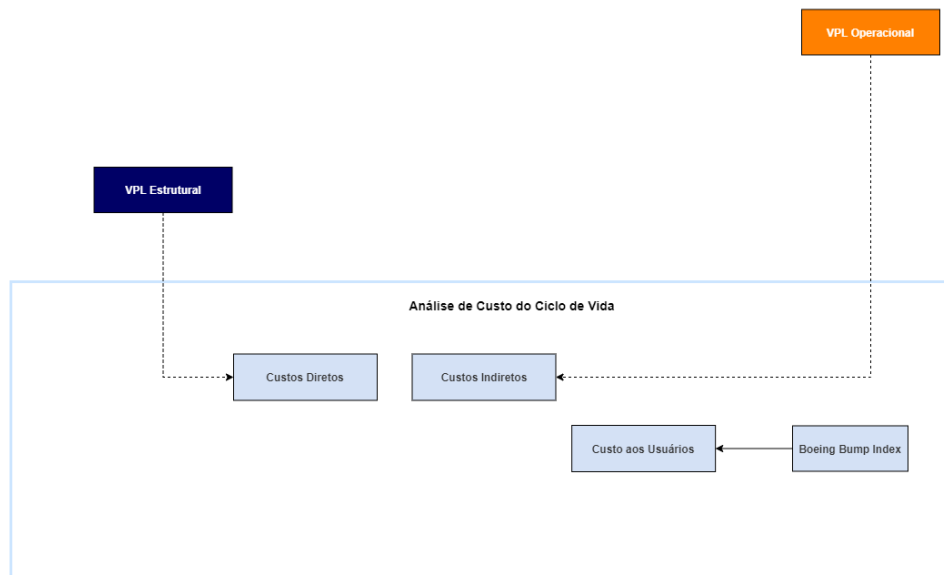


Figura 17 – Procedimento para a etapa de ACCV do método proposto

Por se tratar de uma análise comparativa, o modelo incorpora uma simplificação prevista pelo USDOT (2008). Não há a necessidade de se calcular exatamente todos os valores associados a cada alternativa de M&R, mas somente aqueles que demonstrem diferenças. Assim, os custos comuns a todas as alternativas, por não interferirem no resultado comparativo final, podem ser removidos da análise.

4.2.4 Análise do Ciclo de Vida

A grande etapa de análise do ciclo de vida (ACV) foi admitida ao procedimento metodológico por guardar semelhanças com a base conceitual da ACCV, considerando os efeitos de longo prazo, dentro de determinado escopo. Todas os procedimentos dessa etapa e suas conexões podem ser visualizados na Figura 18.

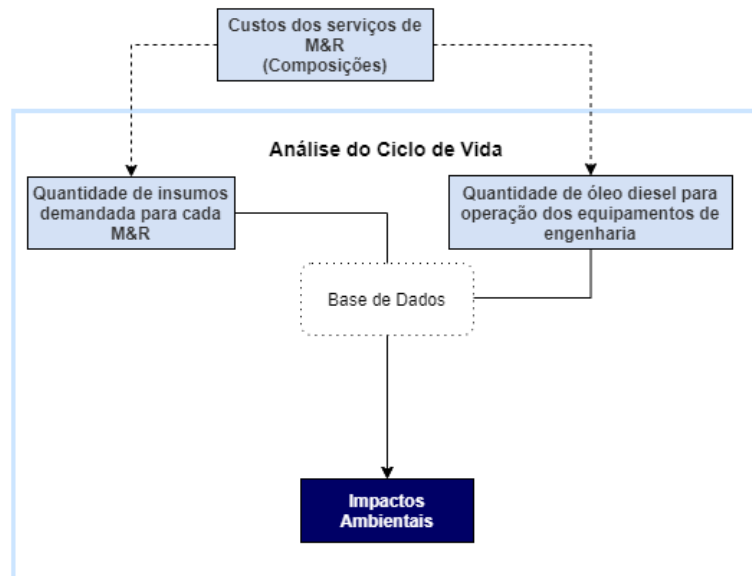


Figura 18 – Procedimento para a etapa de ACV do método proposto

As quatro fases de uma ACV revisadas na literatura (objetivo e escopo, inventário do ciclo de vida – ICV, avaliação do impacto do ciclo de vida – AICV e interpretação dos resultados) devem compor também essa grande etapa. O objetivo dessa análise é calcular os impactos ambientais dos cenários de M&R propostos na etapa de Projeções Estruturais. O escopo dessa meta é delimitado nas fases de extração, produção e transporte dos insumos necessários para as atividades de M&R previstas em cada cenário, juntamente com a fase de obra, que abrange a operação de equipamentos de engenharia. A fase de obra, então, foi simplificada pelo consumo de combustível dos equipamentos de engenharia, em função das suas horas produtivas, conforme demonstrado por NASCIMENTO *et al.* (2020).

Seguindo diversos exemplos relatados na literatura (CHEN e WANG, 2018, ISLAM *et al.*, 2016; NASCIMENTO *et al.*, 2020), os inventários necessitam ser formados para a obtenção de informações sobre os valores unitários das emissões ao meio ambiente. Sugere-se a utilização do software *Simapro* e do banco de dados *Ecoinvent* para a consolidação do inventário e para o cálculo dos impactos ambientais. Para a fase de avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV), existem diversas metodologias disponíveis na literatura para esse fim. O procedimento metodológico dessa tese, assim como vários trabalhos (CHERUBINI *et al.*, 2019; LOIJOS *et al.*, 2013; PILGER *et al.*, 2020), propõe a adoção do método CML-IA (GUINÉE *et al.*, 2002), desenvolvido pelo Centro de

Ciências Ambientais da Universidade de Leiden. Nesse método, é possível calcular os seguintes impactos:

- Esgotamento de recursos abióticos (Sb_{eq} e MJ em combustíveis fósseis)
- Mudanças climáticas - Potencial de aquecimento global para um horizonte de tempo de 100 anos (GWP100) (CO_2_{eq})
- Destruição do ozônio estratosférico (CFC-11 $_{eq}$)
- Toxicidade humana (1,4-DB $_{eq}$)
- Ecotoxicidade aquática em água doce (1,4-DB $_{eq}$)
- Ecotoxicidade marinha (1,4-DB $_{eq}$)
- Ecotoxicidade terrestre (1,4-DB $_{eq}$)
- Formação de foto-oxidante ($C_2H_4_{eq}$)
- Acidificação (SO_2_{eq})
- Eutrofização ($PO_4^{3-}{}_{eq}$)

4.2.5 Sistema de Suporte à Decisão

O objetivo dessa grande etapa de suporte a decisão é fornecer uma ferramenta de apoio à tomada de decisão viável e que consiga integrar os aspectos econômicos e ambientais de maneira satisfatória. A visão geral dessa etapa está na Figura 19.

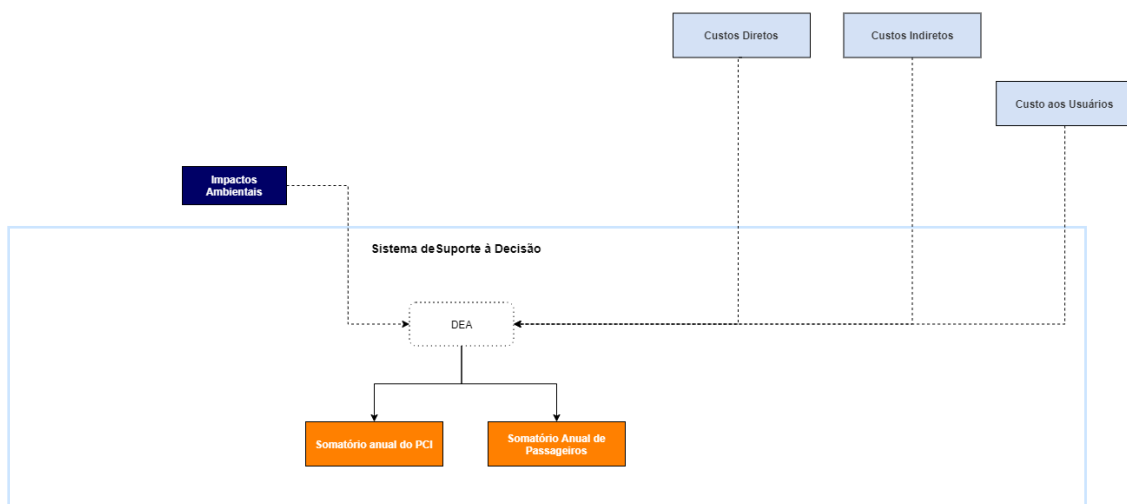


Figura 19 – Procedimento para a etapa de suporte à decisão do método proposto

A ideia geral dessa etapa foi concebida no trabalho de NASCIMENTO *et al.* (2020). Trata-se de uma modelagem DEA VRS, orientado às saídas, para que o problema seja invariante de translação em suas entradas, conforme visto na revisão da literatura. Esse mesmo trabalho justificou a adoção do DEA para essa aplicação devido à semelhança produtiva dos segmentos de pista de pouso e decolagem. Todos eles, compondo uma mesma pista, são dimensionados pela engenharia civil com a mesma técnica, utilizando os mesmos insumos e construídos inicialmente em lote único. Eles ainda são capazes de suportar os mesmos carregamentos das aeronaves e são submetidos às mesmas intempéries climáticas.

As entradas são constituídas pelos impactos ambientais calculados na grande etapa de ACV e pelos custos diretos, indiretos e dos usuários oriundos da grande etapa de ACCV. As saídas do sistema compreendem o somatório do número anual de passageiros movimentados e o somatório dos índices anuais do PCI. Esse modelo busca representar a atividade fim de um aeródromo, ou seja, movimentar mais passageiros e manter o pavimento em níveis elevados de condição, tendo como insumos os impactos ambientais e os custos associados.

O método importa todas as fases de pré-processamento dos dados para o DEA:

- seleção das entradas e saídas do sistema descrito por ABREU *et al.* (2005);
- seleção do número de DMU pelo método de TRAN *et al.* (2010);
- balanceamento da magnitude dos dados (normalização média) e
- tratamento dos valores ausentes, negativos e zeros, por meio da adição de constantes nas entradas, quando necessário.

O método utiliza a eficiência composta como parâmetro de ranqueamento entre as três possíveis alternativas para cada DMU (segmentos homogêneos). Dessa forma, busca-se contornar o possível problema de baixa discriminação no modelo. Após os cálculos das eficiências, será atribuído a cada segmento homogêneo o cenário de maior eficiência para o seu caso, quando todas as DMU do processo forem ranqueadas.

5 ESTUDO DE CASO: APLICAÇÃO DO PROPOSTO SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS

5.1 Considerações iniciais

Um estudo de caso foi realizado com todas as etapas propostas pelo procedimento metodológico exposto no Capítulo 4. O proposto sistema de gerenciamento de pavimentos aeroportuários (SGPA) foi aplicado em uma das pistas de pouso e decolagem do Aeroporto Internacional de Brasília (AIB) – Presidente Juscelino Kubitschek (IATA: BSB; ICAO: SBBR). Essa infraestrutura foi escolhida por já possuir um SGPA simplificado e por permitir o acompanhamento dos ensaios realizados no ano de 2017.

Em termos operacionais, o AIB destaca-se nacionalmente. Ele é o 3º maior aeroporto do país em movimentação internacional de passageiros e possui a maior capacidade de pista do Brasil. Apenas em 2017 foram registrados os seguintes números (INFRAMÉRICA, 2020):

- 12.385 pousos e decolagens por mês ou 412 por dia, em média;
- 148.619 movimentações no ano;
- Média de 46 mil passageiros/dia, sendo, aproximadamente, 28% em embarque, 28% em desembarque e 44% em conexões;
- 466 mil passageiros internacionais no ano;
- 7,1 milhões de passageiros em conexão; e
- 17 milhões de passageiros no total.

Este aeroporto possui duas pistas de pouso (11L-29R e 11R-29L) e, desde 2016, vem realizando operações paralelas independentes. Sua situação atual permite a interdição de uma pista em horários de pico sem que a outra exceda sua capacidade. No entanto, para respeitar as limitações do método proposto, conforme descrito no item 4.2.2, o estudo de caso considera, em cenário hipotético, que há apenas uma única pista 11L-29R. Esta adaptação permite o exercício de sobrecarregar uma única pista com a demanda do aeroporto e verificar as consequências sobre os custos indiretos de uma ACCV.

Para a melhor compreensão dos efeitos de algumas variáveis que compõem o método a ser ilustrado, os resultados são apresentados, didaticamente, em tópicos. Cabe

ressaltar que, para que o método seja aplicado, é necessário que o tomador de decisão já tenha definido suas políticas de intervenção de M&R, o regime de trabalho adotado (integral ou fora do pico) e o cenário de previsão de demanda de passageiros (otimista, médio ou pessimista). Esses três fatores delimitaram o planejamento do experimento, constituído por doze combinações, conforme a Tabela 7.

Tabela 7 – Combinações de resultados do planejamento de experimento

COMBINAÇÃO	POLÍTICA DE INTERVENÇÃO	REGIME DE TRABALHO	PREVISÃO DE DEMANDA
1	Atrito adequado	Integral	Média
2	Atrito inadequado	Fora do pico	Média
3	Atrito inadequado	Integral	Média
4	Atrito adequado	Fora do pico	Média
5	Atrito adequado	Integral	Otimista
6	Atrito inadequado	Fora do pico	Otimista
7	Atrito inadequado	Integral	Otimista
8	Atrito adequado	Fora do pico	Otimista
9	Atrito adequado	Integral	Pessimista
10	Atrito inadequado	Fora do pico	Pessimista
11	Atrito inadequado	Integral	Pessimista
12	Atrito adequado	Fora do pico	Pessimista

Para fins de simplificação, foram definidas duas políticas de intervenção de M&R. A primeira, denominada “Atrito adequado”, assume a premissa de que não existe a necessidade, durante o período de análise, do aumento da interação pneu-pavimento; portanto, o plano de M&R é composto pelos serviços de manutenção corretiva leve (MCL), manutenção corretiva (MC) e reforço estrutural simples (RES). Na segunda política de intervenção de M&R, o “Atrito inadequado” é tratado com uma camada porosa de atrito nas porções centrais da pista de pouso, uma vez no período de dez anos, se não houve nenhuma intervenção do tipo RES; então, o plano de M&R é composto por MCL, MC e RES em todas as seções da pista de pouso e decolagem, e por manutenção corretiva de atrito (MCA) nas porções centrais.

Os outros dois fatores, regime de trabalho e previsão de demanda, também foram variados dentro da proposta apresentada na Tabela 7. Os serviços de M&R foram aplicados no proposto sistema de gerenciamento de pavimentos aeroportuários nas situações de regime integral de trabalho e de utilização dos períodos fora do pico, utilizando a Equação 15 ou a Equação 16, respectivamente. Já a previsão de demanda foi

variada conforme os cenários médio, pessimista e otimista. Essas previsões são exemplificadas no item 5.2.2 e ilustradas na Figura 25.

A partir desse ponto, o estudo de caso divide-se em outros três itens. O item 5.2 apresenta a aplicação do método proposto pelo capítulo 4, passo a passo, para a Combinação 1 do planejamento do experimento. Os resultados das demais combinações são apresentados no item 5.3. O item 5.4 mostra os efeitos de cada um dos três fatores sobre as variáveis do sistema de gerenciamento de pavimentos aeroportuários proposto, bem como suas possíveis interações. Por fim, o último item ainda demonstra uma análise entre a decisão final de uma análise de custo-benefício e o proposto método de SGPA.

5.2 Resultados da combinação 1: aplicação das cinco grandes etapas do SGPA proposto

5.2.1 Projeções Estruturais

As investigações de campo foram realizadas por meio de aberturas de janelas de inspeção e de extração de corpos de prova asfálticos. O plano de amostragem seguiu as especificações da Tabela 8. As localizações das janelas de inspeção podem ser visualizadas na Figura 20. Foram identificadas três camadas bem definidas, além do subleito: Revestimento em concreto asfáltico, base estabilizada com betume, sub-base de laterita ferruginosa, ou "piçarra" e subleito de solo argiloso vermelho (laterítico LG').

Tabela 8 – Localização das janelas de inspeção

PLANO DE AMOSTRAGEM						
SEGMENTOS	JANELAS DE INSPEÇÃO			EXTRAÇÕES DE CPs ASFÁLTICOS		
	METROS	ESTACA	LADO	METROS	ESTACA	LADO
1	120	6	E	40	2	6E
				80	4	3D
				120	6	3E
				160	8	6D
2	600	30	D	360	18	6E
				520	26	3D
				680	34	3E
				840	42	6D
3	1280	64	E	1120	56	6E
				1240	62	3D

				1400	70	3E
				1520	76	6D
4	2000	100	E / D	1760	88	6E
				1920	96	3D
				2080	104	3E
				2240	112	6D
5	2600	130	E	2480	124	6E
				2560	128	3D
				2640	132	3E
				2720	136	6D
6	3000	150	D	2880	144	6E
				2960	148	3D
				3040	152	3E
				3120	156	6D

CABECEIRA 11L								
TRECHO	DISTÂNCIA (M)	ACOST D	6D	3D	EIXO	3E	6E	ACOST E
SEGMENTO 1	0							
	40						1	
	80			2				
	120					3		1
	160			4				
	200							
SEGMENTO 2	240							
	280							
	320							
	360						5	
	400							
	440							
	480							
	520				6			
	560							
	600	2			7			
	640						8	
	680							
	720							
	760							
	800							
	840			9				
880								
920								
960								
1000								
SEGMENTO 3	1040							
	1080							
	1120						10	
	1160							
	1200							
	1240				11			
	1280					12		3
	1320							
	1360							
	1400						13	
	1440							
	1480							
1520			14					
1560								
1600								
SEGMENTO 4	1640							
	1680							
	1720							
	1760						15	
	1800							
	1840							
	1880							
	1920				16			
	1960							
	2000	4			17			5
	2040							
	2080						18	
	2120							
	2160							
2200								
2240			19					
2280								
2320								
2360								
2400								
SEGMENTO 5	2440							
	2480						20	
	2520							
	2560				21			
	2600					22		6
	2640						23	
	2680							
	2720			24				
2760								
2800								
SEGMENTO 6	2840							
	2880						25	
	2920							
	2960				26			
	3000	7						
	3040						27	
	3080							
	3120			28				
	3160							
	3200							

CABECEIRA 29R								
Legenda:								
	Extração de CPs Asfálticos							
	Abertura de janelas de inspeção							

Figura 20 – Localização das janelas de inspeção

As espessuras verificadas constam da Tabela 9. Nota-se uma grande diversidade de estruturas que influenciarão a delimitação dos segmentos considerados homogêneos para as análises. Em momento oportuno, essas espessuras e o comportamento mecânico retroanalisado por meio das bacias de deformação confirmarão essa heterogeneidade preliminarmente verificada.

Tabela 9 – Espessuras verificadas nas janelas de inspeção

SENTIDO: 11L --> 29R						
SEGMENTOS	JANELAS DE INSPEÇÃO					
	METROS	ESTACA	LADO	CAMADA	ESPESSURA (cm)	ESPESSURA TOTAL (cm)
1	120	6	E	Revestimento (concreto asfáltico)	12	77
				Base estabilizada com betume	33	
				Sub-base de laterita ferruginosa	32	
2	600	30	D	Revestimento (concreto asfáltico)	11	57
				Base estabilizada com betume	23	
				Sub-base de laterita ferruginosa	23	
3	1280	64	E	Revestimento (concreto asfáltico)	11	51
				Base estabilizada com betume	25	
				Sub-base de laterita ferruginosa	15	
4	2000	100	E / D	Revestimento (concreto asfáltico)	10 / 12	70 / 56
				Base estabilizada com betume	27 / 23	
				Sub-base de laterita ferruginosa	33 / 21	
5	2600	130	E	Revestimento (concreto asfáltico)	12	45
				Base estabilizada com betume	26	
				Sub-base de laterita ferruginosa	7	
6	3000	150	D	Revestimento (concreto asfáltico)	11	81
				Base estabilizada com betume	37	
				Sub-base de laterita ferruginosa	33	

Todas as linhas longitudinais afastadas em 3 e 6 metros do eixo, de ambos os lados direito e esquerdo, sofreram análises individualizadas. Foram realizados ensaios deflectométricos (FWD) e para aferição das espessuras das camadas do pavimento (GPR). Os ensaios identificaram três camadas do pavimento de maneira indestrutiva: capa de

concreto asfáltico usinado à quente (CAUQ), camada de base (provavelmente material granular estabilizado com material betuminoso), camada de sub-base, (provavelmente de solo laterítico) e abaixo da última camada encontra-se o subleito de solo natural.

De posse das espessuras dos segmentos homogêneos e deflexões aferidas, os módulos das camadas foram retroanalizados por meio do software BAKFAA. Os valores finais dessa característica mecânica, apurados após análise estatística (valores mínimos de um intervalo de confiança de 95% na distribuição T-Student) estão descritos da Tabela 10 a Tabela 13.

Tabela 10 – Valores retroanalizados de módulo das camadas do lado esquerdo, linha de 3 metros

SEGMENTO	INÍCIO (m)	FIM (m)	MÓDULO MÍNIMO (MPa)			
			SUBLEITO	SUB-BASE	BASE	REVESTIMENTO
2	100	700	485	264	8.515	8.400
3	700	1380	359	273	5.712	9.107
4	1380	1620	328	281	1.269	8.095
5	1620	1980	419	823	2.903	14.001
6	1980	2860	348	248	4.422	11.387
7	2860	3290	730	307	4.836	12.808

Tabela 11 – Valores retroanalizados de módulo das camadas do lado direito, linha de 3 metros

SEGMENTO	INÍCIO (m)	FIM (m)	MÓDULO MÍNIMO (MPa)			
			SUBLEITO	SUB-BASE	BASE	REVESTIMENTO
2	100	540	455	288	9.038	16.237
3	540	940	308	343	5.866	9.731
4	940	1580	367	439	6.355	14.549
5	1580	1900	424	313	6.196	20.158
6	1900	2780	335	216	4.568	7.869
7	2780	3290	619	194	4.931	10.090

Tabela 12 – Valores retroanalizados de módulo das camadas do lado esquerdo, linha de 6 metros

SEGMENTO	INÍCIO (m)	FIM (m)	MÓDULO MÍNIMO (MPa)			
			SUBLEITO	SUB-BASE	BASE	REVESTIMENTO
2	100	1100	393	565	16.620	11.178
3	1100	1660	357	148	4.299	5.951
4	1660	1980	363	159	6.327	12.298
5	1980	2900	313	478	3.195	9.686
6	2900	3290	739	219	3.757	12.155

Tabela 13 – Valores retroanalizados de módulo das camadas do lado direito, linha de 6 metros

SEGMENTO	INÍCIO (m)	FIM (m)	MÓDULO MÍNIMO (MPa)			
			SUBLEITO	SUB-BASE	BASE	REVESTIMENTO
2	100	420	443	414	2.384	8.859
3	420	580	316	68	990	3.405
4	580	1220	330	185	11.653	17.371
5	1220	1580	323	326	4.807	7.317
6	1580	1820	317	286	1.437	19.727
7	1820	2860	346	278	3.299	12.365
8	2860	3290	695	250	3.252	15.402

Em contato com a equipe de controle operacional da concessionária, foram levantados os quantitativos máximos de decolagens anuais por tipo de aeronave, computados nos últimos 5 anos, conforme Tabela 14 e Tabela 15. As taxas de crescimento informadas pela concessionária foram as seguintes:

- Voos domésticos: taxa de crescimento de **2,9%**; e
- Voos internacionais: taxa de crescimento de **4,7%**.

Tabela 14 – Número informado de decolagens domésticas na PPD 11L-29R, por tipo de aeronave

TIPO	SIGLA EQP.	DECOLAGENS ANUAIS	TIPO	SIGLA EQP.	DECOLAGENS ANUAIS
DOMÉSTICO	A320	14772	DOMÉSTICO	BE20	219
	B738	12342		BE9T	193
	B737	5226		BE40	184
	A319	5084		C560	169
	A321	4206		E55P	166
	A318	2450		SR22	163
	F100	2431		C550	143
	AT72	1717		C210	141
	C208	1073		LJ45	140
	E120	1044		H25B	139
	E135	1028		C510	130
	PA34	866		B733	117
	E190	747		C130	77
	E145	663		B752	15
	B734	545		GLF5	8
	E110	513		GLF4	6
	BE9L	435		A332	2
	B722	416		B732	2
	C525	362		B744	2
	E50P	328		B762	2
AT8T	277	A310	1		
BE58	275	B773	1		
LJ35	253	C17	1		
B763	220	MD11	1		

Tabela 15 – Número informado de decolagens internacionais na PPD 11L-29R, por tipo de aeronave

TIPO	SIGLA EQP.	DECOLAGENS ANUAIS	TIPO	SIGLA EQP.	DECOLAGENS ANUAIS
INTERNACIONAL	B738	360	INTERNACIONAL	B733	4
	B752	358		C17	4
	A332	236		C208	4
	B763	229		C25B	4
	B737	185		C295	4
	A319	142		CL30	4
	B772	79		E135	4
	E190	61		F100	4
	A320	59		GL5T	4
	A333	39		GLF6	4
	BE20	30		LJ60	4
	A343	23		MD83	4
	E110	18		B744	3
	IL96	18		B762	3
	LJ35	17		DC10	3
	E120	16		MD11	3
	FA7X	16		C130	2
	GLF5	14		C510	2
	F900	12		F28	2
	GLF4	11		A310	1
	A321	9		A346	1
	LJ45	9		B461	1
	CL60	8		B722	1
	GLEX	8		B732	1
	C750	7		B735	1
	E145	7		B764	1
	F2TH	7		B773	1
	H25B	7		B788	1
	C680	6		C30J	1
	B77L	5		OUTROS (S e D)	69
BE40	5				

Assim, com os valores das espessuras, módulos e mix de aeronaves, as simulações de CDF (*Cumulative Damage Factor*) foram realizadas com o auxílio do software FAARFIELD, para um horizonte de 20 anos. A seguir, na Tabela 16, são apresentados os valores de CDF obtidos em todos os segmentos homogêneos, para cada linha longitudinal. Verifica-se que, em todas as simulações, os danos acumulados no revestimento asfáltico e no subleito são mínimos.

Tabela 16 – Valores de CDF obtidos por meio do *software* FAARFIELD

REVESTIMENTO <i>USER DEFINED</i>					REVESTIMENTO <i>P401/P403 HMA SURFACE</i>				
<i>SUBGRADE CDF</i>					<i>HMA CDF</i>				
SEGMENTO	3D	3E	6D	6E	SEGMENTO	3D	3E	6D	6E
2	0%	0%	0%	0%	2	0%	0%	0%	0%
3	0%	0%	0%	0%	3	0%	0%	1%	0%
4	0%	0%	0%	0%	4	0%	0%	0%	0%
5	0%	0%	0%	0%	5	0%	0%	0%	0%
6	0%	0%	0%	0%	6	0%	0%	0%	0%
7	0%	0%	0%	-	7	0%	0%	0%	-
8	-	-	0%	-	8	-	-	0%	-

A avaliação funcional inicia-se com a segmentação do pavimento. O critério de seleção das seções depende exclusivamente do tipo de pavimento (estrutura e superfície) e da forma como o pavimento é solicitado. A pista 11L-29R possui dois tipos de estrutura: a cabeceira 11 em pavimento rígido (primeiros 100 metros) e o restante em pavimento flexível. Essa diferença caracteriza uma divisão em seções distintas. Durante a operação de uma aeronave, as solicitações no pavimento são diferentes se a aeronave se encontra próxima a uma cabeceira ou uma saída rápida. Em mais detalhe, a pista possui 45 metros de largura, mas apenas uma região central ao eixo da pista é solicitada pela aeronave. Sendo assim, cria-se também uma separação transversal entre as seções. A seção central é chamada de quilha (C), enquanto as seções adjacentes são chamadas de asa (W). A seção de quilha foi definida como a área que engloba 10 metros para ambos os lados nas pistas, a partir do eixo da pista. As áreas restantes até a separação com o acostamento (se houver) são designadas como asa. Asa 1 (W1) situa-se do lado leste do eixo, e a asa 2 (W2) situa-se do lado oeste do eixo.

Assim o critério de seleção das seções envolveu as seguintes regras:

- Estrutura;
- Solicitação das aeronaves no pavimento;
- Interseção entre outros elementos; e
- Uso transversal.

A Tabela 17 descreve um resumo com identificação, tipo de uso, data de construção, tipo de pavimento, área real, largura e comprimento de referência e a data da inspeção de todas as seções da rede. As nomenclaturas podem ser associadas com a localização em planta na pista, conforme ilustra a Figura 21.

Tabela 17 – Inventário da pista 11L-29R

ÁREA TÍPICA	SEGMENTO	SEÇÃO	ANO DE CONSTRUÇÃO	TIPO DE PAVIMENTO	LARGURA (M)	COMPRIMENTO (M)	ÁREA REAL (M ²)	DATA DA INSPEÇÃO
Pista	PP-11L_29R	R00C1	2006	Flexível	35,00	79,00	2.788	17.11.2017
Pista	PP-11L_29R	R05C1	2006	Rígido	20,00	100,00	2.000	17.11.2017
Pista	PP-11L_29R	R05W1	2006	Rígido	12,50	99,00	1.249	17.11.2017
Pista	PP-11L_29R	R05W2	2006	Rígido	12,50	100,00	1.249	17.11.2017
Pista	PP-11L_29R	R10W1	2006	Flexível	12,50	488,00	6.106	17.11.2017
Pista	PP-11L_29R	R10C1	2006	Flexível	20,00	488,00	9.770	17.11.2017
Pista	PP-11L_29R	R10W2	2006	Flexível	12,50	488,00	6.106	17.11.2017
Pista	PP-11L_29R	R15W1	2006	Flexível	12,50	274,00	3.427	17.11.2017
Pista	PP-11L_29R	R15C1	2006	Flexível	20,00	274,00	5.483	17.11.2017
Pista	PP-11L_29R	R15W2	2006	Flexível	12,50	274,00	3.427	17.11.2017
Pista	PP-11L_29R	R20W1	2006	Flexível	12,50	562,00	7.035	17.11.2017
Pista	PP-11L_29R	R20W2	2006	Flexível	12,50	562,00	7.035	17.11.2017
Pista	PP-11L_29R	R20C1	2006	Flexível	20,00	562,00	11.256	17.11.2017
Pista	PP-11L_29R	R25W1	2006	Flexível	12,50	265,00	3.319	17.11.2017
Pista	PP-11L_29R	R25C1	2006	Flexível	20,00	265,00	5.310	17.11.2017
Pista	PP-11L_29R	R25W2	2006	Flexível	12,50	265,00	3.319	17.11.2017
Pista	PP-11L_29R	R30W1	2006	Flexível	12,50	268,00	3.355	17.11.2017
Pista	PP-11L_29R	R30C1	2006	Flexível	20,00	268,00	5.368	17.11.2017
Pista	PP-11L_29R	R30W2	2006	Flexível	12,50	268,00	3.355	17.11.2017
Pista	PP-11L_29R	R35W1	2006	Flexível	12,50	168,00	2.104	17.11.2017
Pista	PP-11L_29R	R35C1	2006	Flexível	20,00	168,00	3.367	17.11.2017
Pista	PP-11L_29R	R35W2	2006	Flexível	12,50	168,00	2.104	17.11.2017
Pista	PP-11L_29R	R40W1	2006	Flexível	12,50	975,00	12.195	17.11.2017
Pista	PP-11L_29R	R40C1	2006	Flexível	20,00	975,00	19.513	17.11.2017
Pista	PP-11L_29R	R40W2	2006	Flexível	12,50	975,00	12.195	17.11.2017
Pista	PP-11L_29R	R45W1	2006	Flexível	12,50	100,00	1.250	17.11.2017
Pista	PP-11L_29R	R45C1	2006	Flexível	20,00	100,00	2.000	17.11.2017
Pista	PP-11L_29R	R45W2	2006	Flexível	12,50	100,00	1.250	17.11.2017
Pista	PP-11L_29R	R50C1	2006	Flexível	60,00	81,00	4.885	17.11.2017

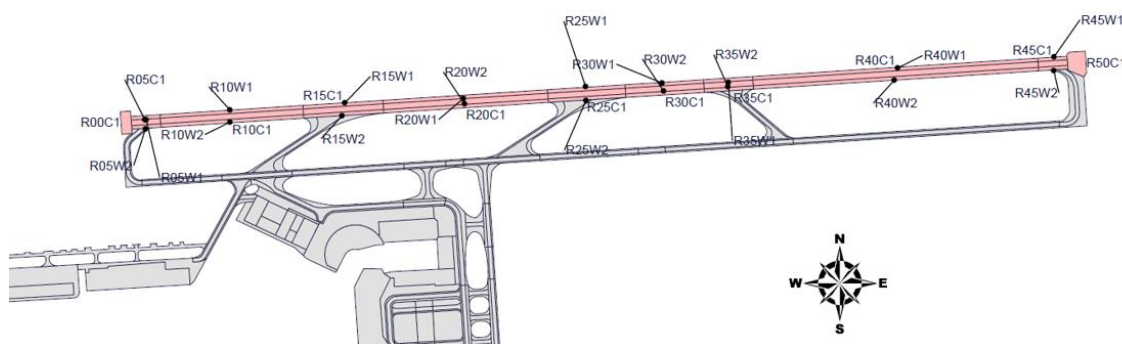


Figura 21 – Localização das seções avaliadas da pista 11L-29R, em planta

O levantamento visual contínuo realizado com equipamento *PavScan* demonstrou que a maioria dos defeitos de superfície encontrados se refere a trincas tipo couro de jacaré, trincas longitudinais (em geral, juntas construtivas) ou transversais e desagregação. A Figura 22 mostra a concentração encontrada.

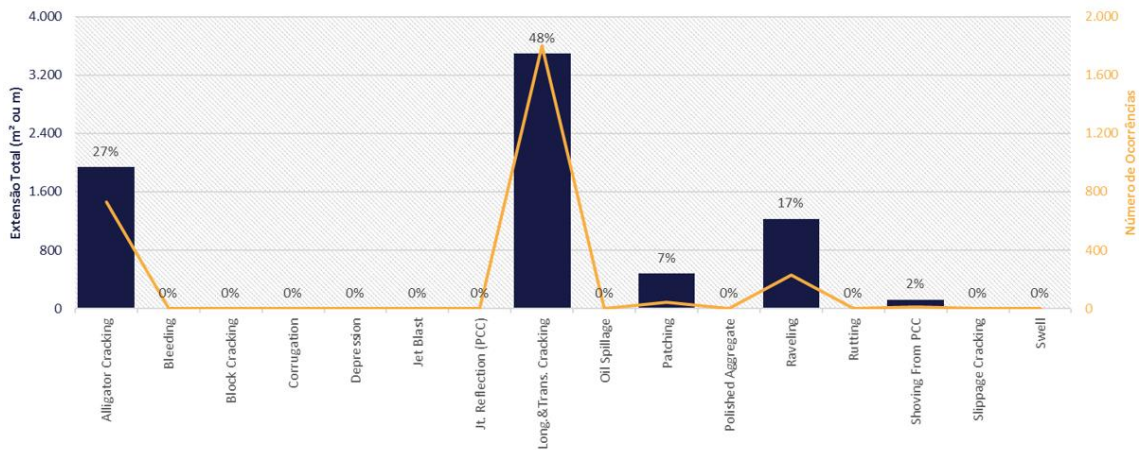


Figura 22 – Concentração de defeitos por área típica nos pavimentos flexíveis

Em seguida, para cada segmento homogêneo, foi possível calcular o PCI atual, segundo os critérios de tipo, quantidade e severidade de defeitos, de acordo com a norma ASTM D5340. Conforme o valor de PCI obtido, foi possível realizar a classificação dos segmentos, conforme demonstrado na Figura 23.

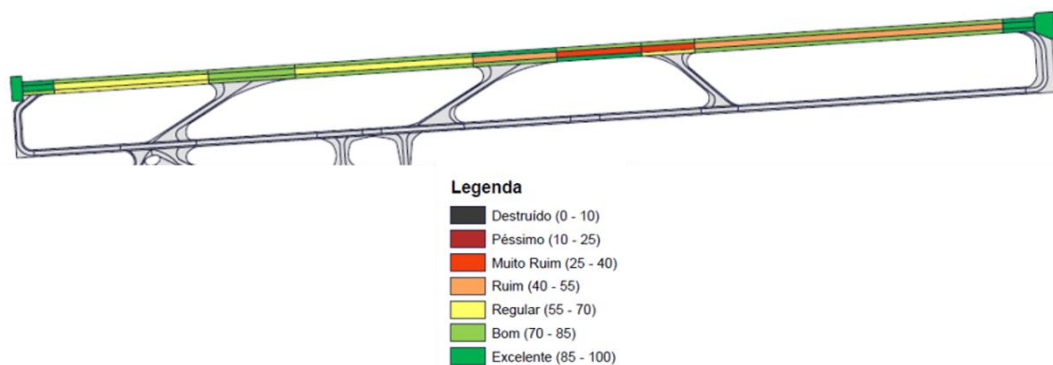


Figura 23 – Classificação do PCI dos segmentos homogêneos

Após os cálculos de PCI por segmento homogêneo, utilizou-se, como ferramenta, o aplicativo *Paver* para a projeção do PCI futuro da pista, de acordo com o tráfego especificado, caso nenhuma intervenção fosse planejada (Tabela 18). Os valores de PCI podem, em primeiro momento, parecer contrastantes com os danos acumulados previstos pela Tabela 16. Lembra-se, porém, que o PCI reflete as condições superficiais do pavimento e, portanto, não deve ser ligado necessariamente à sua condição estrutural. Os segmentos com piores índices de PCI são exatamente aqueles que sofrem com maior desgaste advindo da frenagem das aeronaves e, por sua vez, passam pelo processo de desemborrachamento com maior frequência. Esse tipo de manutenção desgasta superficialmente o pavimento desses segmentos que, por vezes, necessita ser remendado. Essa solução altera sobremaneira os índices de PCI desses segmentos, mas suas capacidades estruturais permanecem quase inalteradas.

Tabela 18 – PCI atual e futuro no cenário sem intervenções de M&R

SEGMENTO	SEÇÃO	PCI									
		2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
PP-11L_29R	R00C1	94	89	85	81	78	76	74	72	70	69
PP-11L_29R	R05C1	93	88	85	83	83	83	83	82	82	80
PP-11L_29R	R05W1	93	88	85	83	83	83	83	82	82	80
PP-11L_29R	R05W2	84	83	83	83	83	82	82	80	79	77
PP-11L_29R	R10C1	68	67	66	66	65	64	64	63	62	61
PP-11L_29R	R10W1	74	72	70	69	68	67	66	66	65	64
PP-11L_29R	R10W2	69	68	67	66	66	65	64	64	63	62
PP-11L_29R	R15C1	74	72	70	69	68	67	66	66	65	64
PP-11L_29R	R15W1	85	81	78	76	73	72	70	69	68	67
PP-11L_29R	R15W2	78	75	73	71	70	69	68	67	66	65
PP-11L_29R	R20C1	61	60	58	56	54	51	48	45	41	36
PP-11L_29R	R20W1	82	79	76	74	72	70	69	68	67	66
PP-11L_29R	R20W2	84	80	78	75	73	71	70	69	68	67
PP-11L_29R	R25C1	55	53	50	46	42	38	33	28	23	19
PP-11L_29R	R25W1	90	86	82	79	76	74	72	70	69	68
PP-11L_29R	R25W2	85	81	78	76	73	72	70	69	68	67
PP-11L_29R	R30C1	38	33	28	23	19	14	9	5	0	0
PP-11L_29R	R30W1	80	77	75	73	71	69	68	67	67	66
PP-11L_29R	R30W2	86	82	79	76	74	72	70	69	68	67
PP-11L_29R	R35C1	39	34	29	24	20	15	10	6	1	0
PP-11L_29R	R35W1	72	70	69	68	67	66	66	65	64	64
PP-11L_29R	R35W2	57	55	52	49	46	42	38	33	28	23
PP-11L_29R	R40C1	41	36	31	26	22	17	12	8	3	0
PP-11L_29R	R40W1	76	74	72	70	69	68	67	66	66	65
PP-11L_29R	R40W2	77	75	73	71	69	68	67	67	66	65
PP-11L_29R	R45C1	91	87	83	80	77	74	72	71	69	68
PP-11L_29R	R45W1	94	89	85	81	78	76	74	72	70	69
PP-11L_29R	R45W2	90	86	82	79	76	74	72	70	69	68
PP-11L_29R	R50C1	94	89	85	81	78	76	74	72	70	69

Verificou-se, nas análises apresentadas, que todos os segmentos da pista de pouso possuem capacidade estrutural adequada ao tráfego previsto. Assim, como política de intervenção, foram adotados os procedimentos MCL (manutenção corretiva leve), MC (manutenção corretiva) e RES (reforço estrutural simples), conforme Tabela 1, para as simulações do comportamento do PCI desse segmento após as intervenções. Conforme o método proposto, foram definidos os três cenários para conferir os PCI mínimos de 70, 55 e 85 (Cenário 1, Cenário 2 e Cenário 3, respectivamente). Definidas essas restrições, as alternativas de cenário de M&R foram definidas, conforme Tabela 19, Tabela 20 e Tabela 21.

Tabela 19 – Plano de M&R para o Cenário 1 (PCI mínimo = 70) – Atrito adequado

SEGMENTO	SEÇÃO	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
PP-11L_29R	R00C1										MCL
PP-11L_29R	R05C1										
PP-11L_29R	R05W1										
PP-11L_29R	R05W2										
PP-11L_29R	R10C1	MC									
PP-11L_29R	R10W1				MCL						
PP-11L_29R	R10W2	MC									
PP-11L_29R	R15C1				MCL						
PP-11L_29R	R15W1							MCL			
PP-11L_29R	R15W2				MCL						
PP-11L_29R	R20C1	MC			MCL						
PP-11L_29R	R20W1						MCL				
PP-11L_29R	R20W2						MCL				
PP-11L_29R	R25C1	RES							MCL		
PP-11L_29R	R25W1								MCL		
PP-11L_29R	R25W2							MCL			
PP-11L_29R	R30C1	RES						MCL		MCL	
PP-11L_29R	R30W1					MCL					
PP-11L_29R	R30W2							MCL			
PP-11L_29R	R35C1	RES						MCL			
PP-11L_29R	R35W1		MCL								
PP-11L_29R	R35W2	MC	MCL				MCL				
PP-11L_29R	R40C1	RES						MCL			
PP-11L_29R	R40W1				MCL						
PP-11L_29R	R40W2				MCL						
PP-11L_29R	R45C1								MCL		
PP-11L_29R	R45W1									MCL	
PP-11L_29R	R45W2								MCL		
PP-11L_29R	R50C1										MCL

Tabela 20 – Plano de M&R para o Cenário 2 (PCI mínimo = 55) – Atrito adequado

SEGMENTO	SEÇÃO	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
PP-11L_29R	R00C1										
PP-11L_29R	R05C1										
PP-11L_29R	R05W1										
PP-11L_29R	R05W2										
PP-11L_29R	R10C1										
PP-11L_29R	R10W1										
PP-11L_29R	R10W2										
PP-11L_29R	R15C1										
PP-11L_29R	R15W1										
PP-11L_29R	R15W2										
PP-11L_29R	R20C1						RES				
PP-11L_29R	R20W1										
PP-11L_29R	R20W2										
PP-11L_29R	R25C1	RES									
PP-11L_29R	R25W1										
PP-11L_29R	R25W2										
PP-11L_29R	R30C1	RES									
PP-11L_29R	R30W1										
PP-11L_29R	R30W2										
PP-11L_29R	R35C1	RES									
PP-11L_29R	R35W1										
PP-11L_29R	R35W2		RES								
PP-11L_29R	R40C1	RES									
PP-11L_29R	R40W1										
PP-11L_29R	R40W2										
PP-11L_29R	R45C1										
PP-11L_29R	R45W1										
PP-11L_29R	R45W2										
PP-11L_29R	R50C1										

Tabela 21 – Plano de M&R para o Cenário 3 (PCI mínimo = 85) – Atrito adequado

SEGMENTO	SEÇÃO	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
PP-11L_29R	R00C1				MCL			MCL			MCL
PP-11L_29R	R05C1			MCL							
PP-11L_29R	R05W1			MCL							
PP-11L_29R	R05W2	MCL									
PP-11L_29R	R10C1	RES									
PP-11L_29R	R10W1	MC			MCL						
PP-11L_29R	R10W2	RES									
PP-11L_29R	R15C1	MC			MCL						
PP-11L_29R	R15W1	MCL				MCL				MCL	
PP-11L_29R	R15W2	MCL		MCL							MCL
PP-11L_29R	R20C1	RES							MCL		
PP-11L_29R	R20W1	MCL			MCL					MCL	
PP-11L_29R	R20W2	MCL				MCL				MCL	
PP-11L_29R	R25C1	RES					MCL				MCL
PP-11L_29R	R25W1			MCL			MCL				MCL
PP-11L_29R	R25W2	MCL				MCL				MCL	
PP-11L_29R	R30C1	RES			MCL			MCL			MCL
PP-11L_29R	R30W1	MCL		MCL							MCL
PP-11L_29R	R30W2		MCL				MCL				MCL
PP-11L_29R	R35C1	RES			MCL			MCL			MCL
PP-11L_29R	R35W1	MC		MCL							
PP-11L_29R	R35W2	RES						MCL			
PP-11L_29R	R40C1	RES				MCL			MCL		
PP-11L_29R	R40W1	MC				MCL					
PP-11L_29R	R40W2	MC				MCL					
PP-11L_29R	R45C1			MCL				MCL			MCL
PP-11L_29R	R45W1				MCL			MCL			MCL
PP-11L_29R	R45W2			MCL			MCL				MCL
PP-11L_29R	R50C1				MCL			MCL			MCL

Com o modelo de deterioração definido para cada segmento e conhecendo o efeito de cada tipo de M&R no PCI após a sua aplicação, é possível estabelecer as três matrizes finais de PCI futuro.

Tabela 22 – PCI futuro no Plano de M&R do Cenário 1 (PCI mínimo = 70) – Atrito adequado

SEGMENTO	SEÇÃO	PCI									
		2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
PP-11L_29R	R00C1	94	89	85	81	78	76	73	72	70	80
PP-11L_29R	R05C1	93	88	85	83	83	83	83	82	82	80
PP-11L_29R	R05W1	93	88	85	83	83	83	83	82	82	80
PP-11L_29R	R05W2	84	83	83	83	83	82	82	80	79	77
PP-11L_29R	R10C1	83	82	82	81	80	79	79	78	77	76
PP-11L_29R	R10W1	74	72	70	80	78	77	75	74	73	73
PP-11L_29R	R10W2	84	83	83	82	81	80	80	79	78	77
PP-11L_29R	R15C1	74	72	70	80	78	77	75	74	73	73
PP-11L_29R	R15W1	85	81	78	76	73	72	82	78	75	72
PP-11L_29R	R15W2	78	75	73	83	81	79	77	75	74	73
PP-11L_29R	R20C1	76	75	73	83	82	80	78	76	74	71
PP-11L_29R	R20W1	82	79	76	74	72	82	79	76	74	72
PP-11L_29R	R20W2	84	80	77	75	73	83	79	76	74	72
PP-11L_29R	R25C1	100	98	95	91	87	83	78	88	86	83
PP-11L_29R	R25W1	90	86	82	79	76	74	72	82	78	74
PP-11L_29R	R25W2	85	81	78	76	73	72	82	78	75	72
PP-11L_29R	R30C1	100	95	89	84	80	75	85	80	90	84
PP-11L_29R	R30W1	80	77	75	73	83	80	77	75	74	72
PP-11L_29R	R30W2	86	82	79	76	74	72	82	78	75	72
PP-11L_29R	R35C1	100	95	90	85	80	75	85	80	75	70
PP-11L_29R	R35W1	72	82	80	79	78	77	76	76	75	74
PP-11L_29R	R35W2	72	82	80	77	74	84	82	80	77	74
PP-11L_29R	R40C1	100	95	90	85	80	76	86	81	76	71
PP-11L_29R	R40W1	76	74	72	82	80	78	76	75	74	73
PP-11L_29R	R40W2	77	74	72	82	80	78	76	75	74	73
PP-11L_29R	R45C1	91	86	83	79	77	74	72	82	78	74
PP-11L_29R	R45W1	94	89	85	81	78	76	73	72	82	77
PP-11L_29R	R45W2	90	86	82	79	76	74	72	82	78	74
PP-11L_29R	R50C1	94	89	85	81	78	76	73	72	82	77

Tabela 23 – PCI futuro no Plano de M&R do Cenário 2 (PCI mínimo = 55) – Atrito adequado

SEGMENTO	SEÇÃO	PCI									
		2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
PP-11L_29R	R00C1	94	89	85	81	78	76	73	72	70	69
PP-11L_29R	R05C1	93	88	85	83	83	83	83	82	82	80
PP-11L_29R	R05W1	93	88	85	83	83	83	83	82	82	80
PP-11L_29R	R05W2	84	83	83	83	83	82	82	80	79	77
PP-11L_29R	R10C1	68	67	67	66	65	64	64	63	62	61
PP-11L_29R	R10W1	74	72	70	69	68	67	66	66	65	64
PP-11L_29R	R10W2	69	68	68	67	66	65	65	64	63	62
PP-11L_29R	R15C1	74	72	70	69	68	67	66	66	65	64
PP-11L_29R	R15W1	85	81	78	76	73	72	70	69	68	67
PP-11L_29R	R15W2	78	75	73	71	70	69	68	67	66	65
PP-11L_29R	R20C1	61	60	58	56	100	99	97	95	93	90
PP-11L_29R	R20W1	82	79	76	74	72	70	69	68	67	66
PP-11L_29R	R20W2	84	80	77	75	73	71	70	69	67	67
PP-11L_29R	R25C1	100	98	95	91	87	83	78	73	68	64
PP-11L_29R	R25W1	90	86	82	79	76	74	72	70	69	68
PP-11L_29R	R25W2	85	81	78	76	73	72	70	69	68	67
PP-11L_29R	R30C1	100	95	89	84	80	75	71	67	63	60
PP-11L_29R	R30W1	80	77	75	73	71	69	68	67	67	66
PP-11L_29R	R30W2	86	82	79	76	74	72	70	69	68	67
PP-11L_29R	R35C1	100	95	90	85	80	75	71	67	63	60
PP-11L_29R	R35W1	72	70	69	68	67	66	66	65	64	64
PP-11L_29R	R35W2	57	100	98	95	93	89	85	81	76	71
PP-11L_29R	R40C1	100	95	90	85	80	76	71	67	63	58
PP-11L_29R	R40W1	76	74	72	70	69	68	67	66	65	65
PP-11L_29R	R40W2	77	74	72	71	69	68	67	66	66	65
PP-11L_29R	R45C1	91	86	83	79	77	74	72	71	69	68
PP-11L_29R	R45W1	94	89	85	81	78	76	73	72	70	69
PP-11L_29R	R45W2	90	86	82	79	76	74	72	70	69	68
PP-11L_29R	R50C1	94	89	85	81	78	76	73	72	70	69

Tabela 24 – PCI futuro no Plano de M&R do Cenário 3 (PCI mínimo = 85) – Atrito adequado

SEGMENTO	SEÇÃO	PCI									
		2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
PP-11L_29R	R00C1	94	89	85	95	90	86	96	92	87	97
PP-11L_29R	R05C1	93	88	98	92	89	88	88	88	87	87
PP-11L_29R	R05W1	93	88	98	92	89	88	88	88	87	87
PP-11L_29R	R05W2	94	93	93	93	93	92	92	90	89	87
PP-11L_29R	R10C1	100	99	99	98	97	96	96	95	94	93
PP-11L_29R	R10W1	89	87	85	95	93	92	90	89	88	88
PP-11L_29R	R10W2	100	99	99	98	97	96	96	95	94	93
PP-11L_29R	R15C1	89	87	85	95	93	92	90	89	88	88
PP-11L_29R	R15W1	95	91	88	86	96	92	89	86	96	93
PP-11L_29R	R15W2	88	85	95	93	91	89	87	86	85	95
PP-11L_29R	R20C1	100	99	97	95	93	90	87	97	96	95
PP-11L_29R	R20W1	92	89	86	96	93	90	88	86	96	93
PP-11L_29R	R20W2	94	90	87	85	95	92	89	86	96	93
PP-11L_29R	R25C1	100	98	95	91	87	97	95	92	89	99
PP-11L_29R	R25W1	90	86	96	91	88	98	94	90	87	97
PP-11L_29R	R25W2	95	91	88	86	96	92	89	86	96	93
PP-11L_29R	R30C1	100	95	89	99	94	89	99	93	88	98
PP-11L_29R	R30W1	90	87	97	94	92	90	88	87	85	95
PP-11L_29R	R30W2	86	96	92	89	86	96	93	89	87	97
PP-11L_29R	R35C1	100	95	90	100	94	89	99	94	89	99
PP-11L_29R	R35W1	87	85	95	94	92	91	90	90	89	88
PP-11L_29R	R35W2	100	98	95	93	89	85	95	93	91	88
PP-11L_29R	R40C1	100	95	90	85	95	90	85	95	90	85
PP-11L_29R	R40W1	91	89	87	85	95	93	91	89	88	87
PP-11L_29R	R40W2	92	89	87	86	96	93	91	90	88	87
PP-11L_29R	R45C1	91	86	96	92	88	85	95	91	87	97
PP-11L_29R	R45W1	94	89	85	95	90	86	96	92	87	97
PP-11L_29R	R45W2	90	86	96	91	88	98	94	90	87	97
PP-11L_29R	R50C1	94	89	85	95	90	86	96	92	87	97

Para a orçamentação dos serviços (Tabela 25), foi utilizada a planilha SICRO (Sistema de Custos Rodoviários) divulgada pelo DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes). A referência adotada foi o mês de julho de 2017. Todos os serviços tiveram seus orçamentos convertidos em relação à unidade de área (m²).

Tabela 25 – Orçamento unitário dos serviços de M&R

POLÍTICA DE M&R	DESCRIÇÃO SICRO	VALOR (R\$ / m ²)	DETALHES
MCL	Selagem de trincas mecanizada em pavimento flexível com emulsão - areia comercial	4,73	0,25 L de emulsão asfáltica por m ²
	Reparo localizado com pintura de ligação - demolição mecânica e serra		1,5% da área 15 cm de espessura
MCA	Selagem de trincas mecanizada em pavimento flexível com emulsão - areia comercial	23,04	0,25 L de emulsão asfáltica por m ²
	Reparo localizado com pintura de ligação - demolição mecânica e serra		1,5% da área 5 cm de espessura
	Concreto asfáltico com asfalto polímero - faixa C - areia e brita comerciais		Recapeamento com camada porosa de atrito (CPA)
	Pintura de ligação		2 cm de espessura
MC	Selagem de trincas mecanizada em pavimento flexível com emulsão - areia comercial	7,37	0,25 L de emulsão asfáltica por m ²
	Reparo localizado com pintura de ligação - demolição mecânica e serra		3% da área 15 cm de espessura
RES	Fresagem contínua de revestimento betuminoso	58,88	Fresagem e recapeamento
	Concreto asfáltico com asfalto polímero - faixa C - areia e brita comerciais		
	Pintura de ligação		5 cm de espessura

A multiplicação das áreas individuais de cada segmento (inventário) pelos valores unitários dos serviços de M&R resulta nos fluxos de caixa de cada cenário. Adotou-se, no cálculo do VPL Estrutural, a taxa de desconto de 6,81% ao ano. Ela é a taxa interna de retorno prevista no contrato de licitação. Os valores agregados de todos os segmentos homogêneos em cada cenário estão representados na Figura 24. Entretanto, segundo o método proposto, cada segmento homogêneo será uma DMU e receberá atenção individualizada. Assim, os valores individuais de VPL estrutural, de VPL Operacional e de BBI serão apresentados na grande etapa de ACCV.

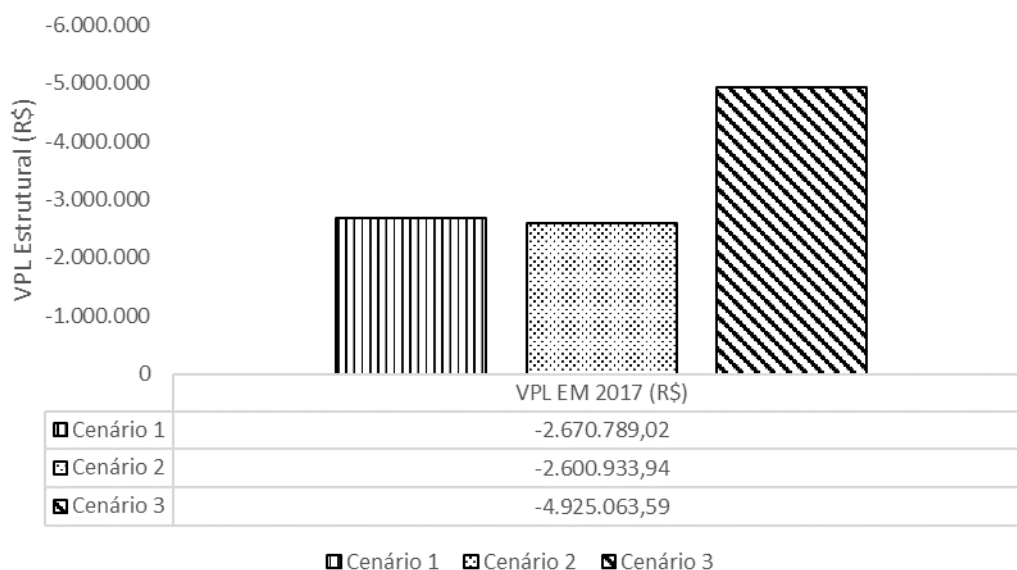


Figura 24 – VPL Estrutural agregado por cenário – Atrito adequado

5.2.2 Projeções Operacionais

De posse dos dados estatísticos provenientes da ANAC (2019) e do IBGE (2018), foi possível, em primeiro momento, realizar a previsão de demanda de passageiros do Aeroporto Internacional de Brasília por meio de cinco algoritmos regressores: Regressão Linear Múltipla, Árvore de Decisão, *Random Forest* com 10 árvores, Máquina de Vetores Suporte (*Support Vector Machines*) em base radial e Redes Neurais Artificiais com 100 camadas ocultas.

Além da variável dependente (passageiros), as variáveis independentes coletadas foram as seguintes:

- Dados de ANAC (2019): Empresa Aérea, Natureza do Voo (doméstico ou internacional), Tipo de Voo (regular ou não regular), ASK (*Available seat kilometer*), RPK (*Revenue seat kilometer*), ATK (*Available tonne kilometer*), RTK (*Revenue tonne kilometer*), Combustível, Distância, Horas Voadas, Decolagens, Carga Paga Km, Carga Grátis Km, Correio Km, Assentos e *Payload*; e
- Dados de IBGE (2018): População do Distrito Federal (DF), População do Brasil, PIB (produto interno bruto) do DF, PIB do Brasil, Participação Setorial no PIB do DF (Agropecuária; Indústria extrativa mineral; Indústria de transformação; Eletricidade, gás e água ; Construção; Comércio e reparação de veículos e de objetos pessoais e de uso doméstico ; Alojamento e alimentação; Transportes e armazenagem; Comunicações;

Intermediação financeira; Atividades imobiliárias, aluguéis e serviços prestados às empresas; Administração pública, defesa e seguridade social; Saúde e educação mercantis; Outros serviços coletivos, sociais e pessoais; e Serviços domésticos), Taxa de Desemprego do DF e Rendimento Médio da População do DF.

Todas as variáveis foram classificadas nos algoritmos como numéricas, com exceção da Natureza de Voo e do Tipo do Voo. Essas últimas foram classificadas como categóricas e receberam variáveis *dummy* (binárias) na modelagem.

Algumas ressalvas devem ser feitas sobre esses dados coletados de RTK e de ATK. No caso estudado, eles não se referem exclusivamente à carga aérea. Eles também são compostos por passageiros (transformados em peso) e correio. Essa composição tem potencial para explicar a previsão de demanda de passageiros e foi avaliada na fase de seleção de variáveis.

Para fins de simplificação, a seleção das variáveis que compuseram o modelo final foi realizada pelo critério do valor- $p < 0,1$ do Teste para Média (teste t), quando as variáveis foram modeladas pela regressão linear múltipla, conforme explicado por TSAI (2009). O valor final do teste t de cada variável selecionada nesse algoritmo está descrito na Tabela 26. Faz-se importante ressaltar a seleção das variáveis operacionais (ASK; ATK; RPK; RTK; e *Payload*) e censitárias/macroeconômicas da região (Comunicações; Construção; Outros serviços coletivos sociais e pessoais; e População do Brasil) na formação do modelo para a previsão da demanda desse aeroporto. Elas parecem refletir a vocação socioeconômica da região.

Tabela 26 – Valores do teste t das variáveis selecionadas pela regressão linear múltipla

VARIÁVEL	ESTIMATIVA	ERRO MÉDIO	VALOR T	Pr(> t)
Intercepto	-0,0192	0,0012	-16,4779	7,12E-61
Ano	0,0892	0,0071	12,5169	6,67E-36
ASK	-0,2675	0,0043	-62,2276	0,00E+00
ATK	-0,4983	0,0033	-152,8934	0,00E+00
Comunicações	0,0109	0,0027	3,9901	6,61E-05
Construção	0,0067	0,0012	5,5569	2,76E-08
Tipo do Voo	0,0370	0,0027	13,6307	3,03E-42
Mês	0,0016	0,0010	1,6664	9,56E-02
Natureza do Voo	0,2133	0,0052	41,0505	0,00E+00
Outros serviços coletivos sociais e pessoais	-0,0185	0,0029	-6,4528	1,11E-10
<i>Payload</i>	0,8466	0,0018	462,4034	0,00E+00
População do Brasil	-0,0366	0,0072	-5,1085	3,26E-07
RPK	1,2126	0,0066	183,2383	0,00E+00
RTK	-0,3355	0,0060	-55,7774	0,00E+00

Todos os algoritmos passaram pelo processo de validação cruzada de dez estágios, cada um contendo 90% dos dados em agrupamento para treinamento (aprendizagem) e o restante em agrupamento de teste. Em cada estágio, foi computado o coeficiente de determinação R^2 para o grupo de treinamento (R^2 – treino) e para o grupo de teste (R^2 – teste), além do erro absoluto médio (*mean absolute error* – MAE). Os valores mínimos, máximos e médios desses parâmetros estão sintetizados na Tabela 27.

Tabela 27 – Valores de avaliação dos algoritmos regressores de demanda de passageiros

REGRESSÃO	VALORES	R^2 - treino	R^2 - teste	MAE
Linear Múltipla	Mínimo	0,9402	0,9375	791
	Máximo	0,9408	0,9428	832
	Médio	0,9405	0,9404	812
Árvore de Decisão	Mínimo	0,8823	0,8762	985
	Máximo	0,8939	0,8967	1216
	Médio	0,8891	0,8874	1087
<i>Random Forest</i>	Mínimo	0,9959	0,9833	296
	Máximo	0,9963	0,9868	314
	Médio	0,9961	0,9852	306
SVM	Mínimo	0,9801	0,9770	456
	Máximo	0,9806	0,9820	473
	Médio	0,9803	0,9797	464
Redes Neurais	Mínimo	0,9870	0,9839	345
	Máximo	0,9884	0,9874	360
	Médio	0,9877	0,9861	353

Pelo critério de maior coeficiente de determinação médio nos grupamentos de teste, o regressor *Random Forest* seria o mais indicado para a previsão da demanda do Aeroporto Internacional de Brasília. Entretanto, SEGAL (2004) já havia relatado que modelos baseados em árvores não são adequados para a realização de extrapolações, visto que eles se apoiam no conceito de agrupamento de vizinhos mais próximos, o que não ocorre quando se tenta predizer dados que não estão no conjunto de treinamento. Assim, optou-se pelo regressor Redes Neurais, que também apresentou bom enquadramento aos grupamentos de treino e de teste. Seus baixos valores de MAE, na ordem de 353 passageiros mensais, ajudaram a corroborar a decisão.

Finda a etapa de regressão, foi possível estabelecer previsões mensais e anuais para a demanda de passageiros pagos e não pagos que movimentarão o aeroporto no horizonte de 2019 a 2026, contemplando o crescimento das variáveis dependentes a taxas anuais variáveis, dentro de suas respectivas probabilidades de ocorrência registradas no histórico dos dados. Assim, formou-se um intervalo de confiança com nível de significância de 5%. A projeção da demanda anualizada até o horizonte de 2026, bem como os limites mínimos e máximos do modelo, encontram-se na Figura 25.

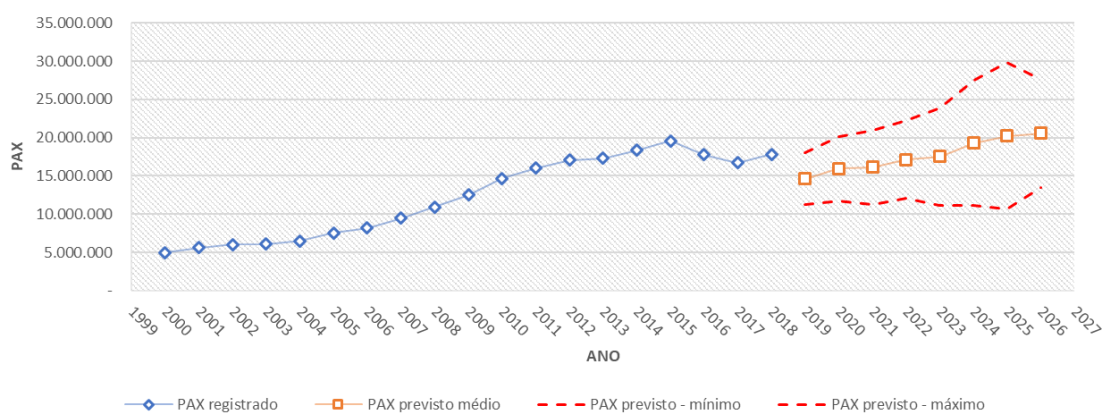


Figura 25 – Previsão de demanda anual de passageiros no horizonte 2019 a 2026

Verifica-se, na Figura 26, que o regressor escolhido conseguiu identificar a sazonalidade ocorrida em anos anteriores para a projeção futura da demanda de passageiros. Os meses de maior movimentação, enquadrados em julho, dezembro e janeiro, assim como o mês de menor movimento, situado em fevereiro, correspondem aos índices operacionais factualmente registrados no aeroporto.

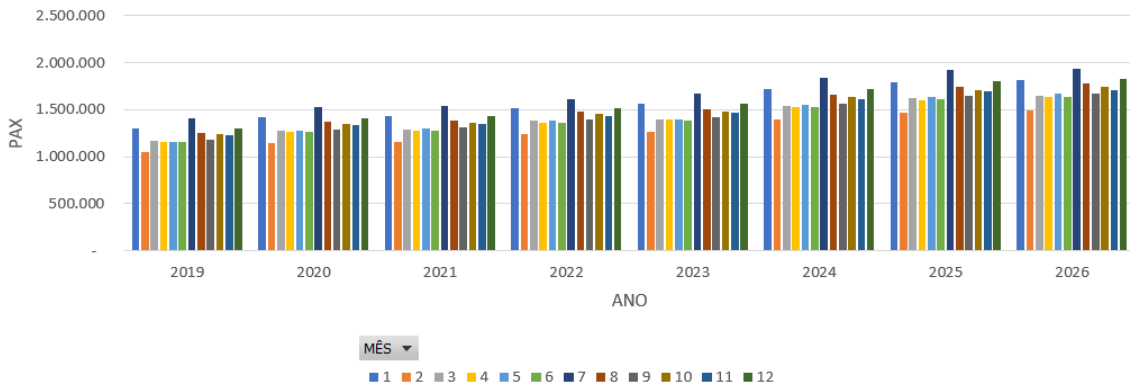


Figura 26 – Previsão de demanda mensal de passageiros no horizonte 2019 a 2026

Nas previsões realizadas, o mês de fevereiro apresenta a menor movimentação de passageiros no aeroporto. Portanto, esse seria o mês mais propício para a programação das intervenções no pavimento da pista de pouso e decolagem. Os cálculos propostos para previsão horária de passageiros foram desenvolvidos, então, nesse mês, dividindo a previsão mensal por 28 ou 29 dias, considerando 24 horas por dia.

Para o prosseguimento dessa grande etapa, é necessário calcular os tempos de interdição de pista (TIP) (Equação 15). Esses tempos foram previstos por meio da sincronização dos Planos de M&R (Tabela 19, Tabela 20 e Tabela 21) com as produtividades de cada tipo de ação de M&R (base SICRO). Esse valor foi multiplicado pela área de cada segmento homogêneo. No método, dentro de cada cenário e para cada ano, considera-se TIP o maior valor dentre todos os segmentos homogêneos. As produtividades relatadas pela base de dados foram 0,0018 m²/h, 0,0023 m²/h e 0,0029 m²/h para os respectivos serviços de MCL, MC e RES. Os TIP considerados, a cada ano, por cenário, estão na Tabela 28.

Tabela 28 – Tempo de interdição do pavimento (TIP), em horas – Atrito adequado

ANO	TIP (horas)		
	CENÁRIO	CENÁRIO	CENÁRIO
	1	2	3
2017	61,1	61,1	61,1
2018	3,8	10,2	6,1
2019	0,0	0,0	6,2
2020	22,1	0,0	12,8
2021	6,1	36,9	35,4
2022	12,8	0,0	9,6
2023	35,4	0,0	9,7
2024	9,6	0,0	35,4
2025	9,7	0,0	12,8
2026	5,1	0,0	9,7

O próximo passo dessa grande etapa diz respeito ao cálculo do fluxo de caixa incremental. Para tal, basta realizar o fluxo de caixa sem qualquer serviço de M&R (com todos os passageiros anuais da previsão) e subtrair do fluxo de caixa que considera o número de passageiros perdidos anuais daquele cenário, em decorrência do plano de M&R. Os quatro fluxos de caixa (sem M&R, cenário 1, cenário 2 e cenário 3) estão compreendidos da Tabela 29 a Tabela 32. Todos os valores foram proporcionais à quantidade de passageiros movimentados, tendo como base o fluxo de caixa do ano de 2017, com algumas ressalvas:

- COFINS, PIS e ISS incidiram sobre o somatório das receitas, nas alíquotas de 7,6%, 1,65% e 2%, respectivamente;
- Amortização e depreciação com valor anual constante de R\$ 46.313.000,00;
- Outorga variável foi composta pelo percentual de 2% sobre o somatório das receitas;
- Amortização da outorga fixa foi obtida por meio da subtração entre o valor de R\$ 136.857.000,00 e o da outorga variável; e
- Impostos e taxas calculados com o percentual de 0,06% sobre o total dos custos dos serviços prestados.

Tabela 29 – Fluxo de caixa sem qualquer M&R

	ANO									
	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
PASSAGEIROS PREVISTOS	16.737.545,00	17.810.957,00	14.624.058,80	15.944.970,53	16.113.382,67	17.138.417,98	17.508.392,00	19.303.802,46	20.248.286,57	20.551.137,61
RECEITA OPERACIONAL LÍQUIDA (R\$ 1.000,00)										
Receita Bruta - Tarifária	230.079,00	195.829,02	160.789,51	175.312,75	177.164,42	188.434,54	192.502,36	212.242,65	222.627,12	225.956,93
Receita Bruta - Não Tarifária	170.799,00	181.752,68	149.231,84	162.711,14	164.429,71	174.889,73	178.665,14	196.986,48	206.624,51	209.714,97
Contribuição Mensal	-46.052,00									
Outras Receitas	354,00	376,70	309,30	337,24	340,80	362,48	370,30	408,28	428,25	434,66
COFINS	-30.053,00	-28.724,84	-23.585,13	-25.715,45	-25.987,05	-27.640,19	-28.236,87	-31.132,44	-32.655,67	-33.144,10
PIS	-6.525,00	-6.236,31	-5.120,46	-5.582,96	-5.641,93	-6.000,83	-6.130,37	-6.759,02	-7.089,72	-7.195,76
ISS	-4.980,00	-3.924,11	-3.221,98	-3.513,00	-3.550,10	-3.775,94	-3.857,45	-4.253,02	-4.461,11	-4.527,83
Receita Líquida	313.622,00	339.073,13	278.403,09	303.549,73	306.755,84	326.269,78	333.313,10	367.492,93	385.473,39	391.238,87
CUSTOS DOS SERVIÇOS PRESTADOS (R\$ 1.000,00)										
Pessoal	57.267,00	60.939,65	50.035,77	54.555,23	55.131,45	58.638,57	59.904,43	66.047,37	69.278,90	70.315,09
Serviços de Terceiros	21.563,00	22.945,88	18.840,19	20.541,93	20.758,89	22.079,45	22.556,08	24.869,11	26.085,89	26.476,06
Utilidades e Telecomunicações	12.140,00	12.918,56	10.607,06	11.565,13	11.687,29	12.430,76	12.699,11	14.001,35	14.686,40	14.906,06
Manutenção	24.340,00	25.900,97	21.266,54	23.187,43	23.432,33	24.922,96	25.460,98	28.071,89	29.445,38	29.885,79
Amortização e depreciação	46.313,00	46.313,00	46.313,00	46.313,00	46.313,00	46.313,00	46.313,00	46.313,00	46.313,00	46.313,00
Amortização Outorga fixa	120.304,00	129.297,83	130.650,39	130.089,78	130.018,30	129.583,27	129.426,24	128.664,25	128.263,40	128.134,87
Outorga variável	6.987,00	7.559,17	6.206,61	6.767,22	6.838,70	7.273,73	7.430,76	8.192,75	8.593,60	8.722,13
Impostos e taxas	167,00	190,04	175,72	181,65	182,41	187,02	188,68	196,75	201,00	202,36
Tecnologia	2.973,00	3.163,66	2.597,59	2.832,22	2.862,13	3.044,20	3.109,92	3.428,83	3.596,59	3.650,39
Outros	7.057,00	7.509,58	6.165,90	6.722,83	6.793,84	7.226,02	7.382,01	8.139,00	8.537,22	8.664,91
Total	299.111,00	316.738,35	292.858,76	302.756,42	304.018,34	311.698,98	314.471,21	327.924,31	335.001,38	337.270,65
LUCRO OPERACIONAL BRUTO (R\$ 1.000,00)	14.511,00	22.334,79	-14.455,67	793,31	2.737,51	14.570,80	18.841,89	39.568,62	50.472,01	53.968,21

Tabela 30 – Fluxo de caixa do Cenário 1

	ANO									
	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
PASSAGEIROS PREVISTOS	16.642.573	17.807.348	14.624.059	15.900.134	16.084.808	17.109.082	17.460.995	19.287.059	20.228.446	20.545.525
RECEITA OPERACIONAL LÍQUIDA (R\$ 1.000,00)										
Receita Bruta - Tarifária	182.982,80	195.789,34	160.789,51	174.819,79	176.850,25	188.112,00	191.981,23	212.058,56	222.408,98	225.895,21
Receita Bruta - Não Tarifária	169.829,86	181.715,85	149.231,84	162.253,61	164.138,12	174.590,37	178.181,47	196.815,63	206.422,05	209.657,69
Contribuição Mensal										
Outras Receitas	351,99	376,63	309,30	336,29	340,19	361,86	369,30	407,92	427,83	434,54
COFINS	-29.902,05	-28.719,02	-23.585,13	-25.643,14	-25.940,97	-27.592,88	-28.160,43	-31.105,44	-32.623,67	-33.135,05
PIS	-6.492,23	-6.235,05	-5.120,46	-5.567,26	-5.631,92	-5.990,56	-6.113,78	-6.753,15	-7.082,77	-7.193,79
ISS	-4.957,40	-3.923,32	-3.221,98	-3.503,12	-3.543,81	-3.769,48	-3.847,01	-4.249,33	-4.456,74	-4.526,60
Receita Líquida	311.812,98	339.004,43	278.403,09	302.696,17	306.211,86	325.711,31	332.410,78	367.174,19	385.095,68	391.132,01
CUSTOS DOS SERVIÇOS PRESTADOS (R\$ 1.000,00)										
Pessoal	56.942,06	60.927,30	50.035,77	54.401,83	55.033,68	58.538,20	59.742,26	65.990,09	69.211,01	70.295,89
Serviços de Terceiros	21.440,65	22.941,23	18.840,19	20.484,16	20.722,08	22.041,65	22.495,02	24.847,54	26.060,33	26.468,83
Utilidades e Telecomunicações	12.071,12	12.915,94	10.607,06	11.532,61	11.666,56	12.409,48	12.664,73	13.989,20	14.672,00	14.901,99
Manutenção	24.201,89	25.895,72	21.266,54	23.122,22	23.390,78	24.880,30	25.392,05	28.047,54	29.416,52	29.877,62
Amortização e depreciação	46.313,00	46.313,00	46.313,00	46.313,00	46.313,00	46.313,00	46.313,00	46.313,00	46.313,00	46.313,00
Amortização Outorga fixa	120.227,71	129.299,36	130.650,39	130.108,81	130.030,43	129.595,72	129.446,36	128.671,36	128.271,82	128.137,25
Outorga variável	7.063,29	7.557,64	6.206,61	6.748,19	6.826,57	7.261,28	7.410,64	8.185,64	8.585,18	8.719,75
Impostos e taxas	166,90	190,01	175,72	181,30	182,18	186,79	188,30	196,62	200,84	202,32
Tecnologia	2.956,13	3.163,02	2.597,59	2.824,26	2.857,06	3.038,99	3.101,50	3.425,86	3.593,07	3.649,39
Outros	7.016,96	7.508,06	6.165,90	6.703,93	6.781,79	7.213,65	7.362,03	8.131,94	8.528,86	8.662,55
Total	298.399,70	316.711,29	292.858,76	302.420,30	303.804,13	311.479,06	314.115,90	327.798,80	334.852,64	337.228,58
LÚCRO OPERACIONAL BRUTO (R\$ 1.000,00)	13.413,27	22.293,14	-14.455,67	275,86	2.407,73	14.232,25	18.294,89	39.375,39	50.243,04	53.903,43

Tabela 31 – Fluxo de caixa do Cenário 2

	ANO									
	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
PASSAGEIROS PREVISTOS	16.681.904	17.790.215	14.624.059	15.944.971	16.081.480	17.138.418	17.508.392	19.303.802	20.248.287	20.538.056
RECEITA OPERACIONAL LÍQUIDA (R\$ 1.000,00)										
Receita Bruta - Tarifária	183.415,23	195.600,96	160.789,51	175.312,75	176.813,66	188.434,54	192.502,36	212.242,65	222.627,12	225.813,09
Receita Bruta - Não Tarifária	170.231,20	181.541,02	149.231,84	162.711,14	164.104,16	174.889,73	178.665,14	196.986,48	206.624,51	209.581,48
Contribuição Mensal										
Outras Receitas	352,82	376,26	309,30	337,24	340,12	362,48	370,30	408,28	428,25	434,38
COFINS	-29.964,56	-28.691,39	-23.585,13	-25.715,45	-25.935,60	-27.640,19	-28.236,87	-31.132,44	-32.655,67	-33.123,00
PIS	-6.505,80	-6.229,05	-5.120,46	-5.582,96	-5.630,76	-6.000,83	-6.130,37	-6.759,02	-7.089,72	-7.191,18
ISS	-4.966,76	-3.919,54	-3.221,98	-3.513,00	-3.543,08	-3.775,94	-3.857,45	-4.253,02	-4.461,11	-4.524,95
Receita Líquida	312.562,14	338.678,27	278.403,09	303.549,73	306.148,51	326.269,78	333.313,10	367.492,93	385.473,39	390.989,82
CUSTOS DOS SERVIÇOS PRESTADOS (R\$ 1.000,00)										
Pessoal	57.076,62	60.868,68	50.035,77	54.555,23	55.022,29	58.638,57	59.904,43	66.047,37	69.278,90	70.270,33
Serviços de Terceiros	21.491,32	22.919,16	18.840,19	20.541,93	20.717,79	22.079,45	22.556,08	24.869,11	26.085,89	26.459,20
Utilidades e Telecomunicações	12.099,64	12.903,52	10.607,06	11.565,13	11.664,15	12.430,76	12.699,11	14.001,35	14.686,40	14.896,57
Manutenção	24.259,09	25.870,81	21.266,54	23.187,43	23.385,94	24.922,96	25.460,98	28.071,89	29.445,38	29.866,76
Amortização e depreciação	46.313,00	46.313,00	46.313,00	46.313,00	46.313,00	46.313,00	46.313,00	46.313,00	46.313,00	46.313,00
Amortização Outorga fixa	120.211,01	129.306,64	130.650,39	130.089,78	130.031,84	129.583,27	129.426,24	128.664,25	128.263,40	128.140,42
Outorga variável	7.079,99	7.550,36	6.206,61	6.767,22	6.825,16	7.273,73	7.430,76	8.192,75	8.593,60	8.716,58
Impostos e taxas	167,22	189,95	175,72	181,65	182,27	187,02	188,08	196,75	201,00	202,30
Tecnologia	2.963,12	3.159,98	2.597,59	2.832,22	2.856,47	3.044,20	3.109,92	3.428,83	3.596,59	3.648,06
Outros	7.033,54	7.500,83	6.165,90	6.722,83	6.780,39	7.226,02	7.382,01	8.139,00	8.537,22	8.659,40
Total	298.694,54	316.582,93	292.858,76	302.756,42	303.779,29	311.698,98	314.470,61	327.924,31	335.001,38	337.172,63
LÚCRO OPERACIONAL BRUTO (R\$ 1.000,00)	13.867,60	22.095,34	-14.455,67	793,31	2.369,21	14.570,80	18.842,49	39.568,62	50.472,01	53.817,19

Tabela 32 – Fluxo de caixa do Cenário 3

	ANO									
	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
PASSAGEIROS PREVISTOS	16.632.824	17.764.405	14.598.112	15.921.301	16.056.605	17.123.471	17.485.174	19.267.090	20.213.689	20.510.405
RECEITA OPERACIONAL LÍQUIDA (R\$ 1.000,00)										
Receita Bruta - Tarifária	182.875,60	195.317,18	160.504,23	175.052,51	176.540,16	188.270,21	192.247,08	211.839,00	222.246,72	225.509,07
Receita Bruta - Não Tarifária	169.730,37	181.277,63	148.967,07	162.469,60	163.850,32	174.737,20	178.428,22	196.611,85	206.271,46	209.299,31
Contribuição Mensal										
Outras Receitas	351,79	375,72	308,75	336,74	339,60	362,16	369,81	407,50	427,52	433,80
COFINS	-29.886,55	-28.649,76	-23.543,28	-25.677,27	-25.895,49	-27.616,09	-28.199,43	-31.073,23	-32.599,87	-33.078,41
PIS	-6.488,86	-6.220,01	-5.111,37	-5.574,67	-5.622,05	-5.995,60	-6.122,24	-6.746,16	-7.077,60	-7.181,50
ISS	-4.955,08	-3.913,86	-3.216,26	-3.507,78	-3.537,60	-3.772,65	-3.852,34	-4.244,93	-4.453,48	-4.518,86
Receita Líquida	311.627,27	338.186,90	277.909,14	303.099,11	305.674,95	325.985,24	332.871,10	366.794,02	384.814,74	390.463,42
CUSTOS DOS SERVIÇOS PRESTADOS (R\$ 1.000,00)										
Pessoal	56.908,70	60.780,37	49.947,00	54.474,24	54.937,19	58.587,44	59.824,99	65.921,76	69.160,52	70.175,72
Serviços de Terceiros	21.428,09	22.885,90	18.806,77	20.511,43	20.685,74	22.060,19	22.526,17	24.821,82	26.041,32	26.423,58
Utilidades e Telecomunicações	12.064,04	12.884,80	10.588,24	11.547,97	11.646,10	12.419,92	12.682,27	13.974,72	14.661,30	14.876,51
Manutenção	24.187,71	25.833,28	21.228,80	23.153,00	23.349,77	24.901,22	25.427,21	28.018,50	29.395,06	29.826,55
Amortização e depreciação	46.313,00	46.313,00	46.313,00	46.313,00	46.313,00	46.313,00	46.313,00	46.313,00	46.313,00	46.313,00
Amortização Outorga fixa	120.231,84	129.317,59	130.661,40	130.099,82	130.042,40	129.589,61	129.436,10	128.679,83	128.278,09	128.152,16
Outorga variável	7.059,16	7.539,41	6.195,60	6.757,18	6.814,60	7.267,39	7.420,90	8.177,17	8.578,91	8.704,84
Impostos e taxas	166,93	189,67	175,51	181,47	181,96	186,90	188,50	196,46	200,73	202,04
Tecnologia	2.954,40	3.155,40	2.592,98	2.828,01	2.852,05	3.041,55	3.105,80	3.422,31	3.590,45	3.643,15
Outros	7.012,85	7.489,95	6.154,96	6.712,85	6.769,90	7.219,72	7.372,22	8.123,52	8.522,64	8.647,74
Total	298.326,72	316.389,36	292.664,25	302.578,98	303.592,71	311.586,93	314.297,16	327.649,09	334.742,01	336.965,30
LUCRO OPERACIONAL BRUTO (R\$ 1.000,00)	13.300,55	21.797,53	-14.755,12	520,14	2.082,25	14.398,31	18.573,94	39.144,93	50.072,72	53.498,12

Os custos indiretos desse fluxo de caixa incremental são atribuídos, então, para cada segmento homogêneo, ano a ano, proporcionalmente ao peso relativo de suas áreas em relação à área total do pavimento. Os valores individuais de cada segmento homogêneo são apresentados na grande etapa de ACCV. De maneira agregada, dentro de cada cenário como um todo, é possível observar cada VPL Operacional na Figura 27, observando a mesma taxa de desconto de 6,81% da etapa anterior.

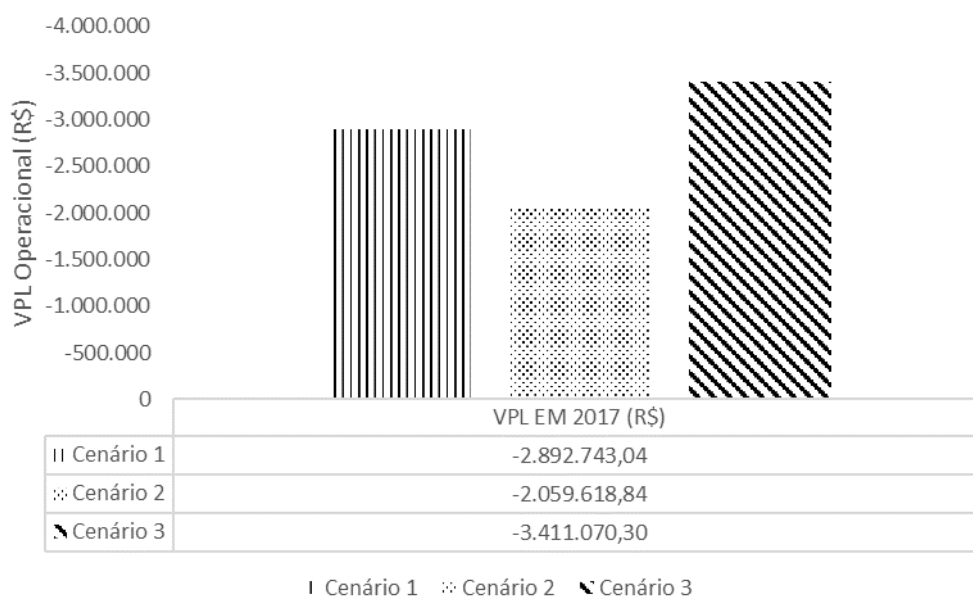


Figura 27 – VPL Operacional agregado por cenário – Atrito adequado, regime integral de trabalho e previsão de demanda média

5.2.3 Análise de Custo do Ciclo de Vida

No método proposto, a análise de custo do ciclo de vida (ACCV), dentro do escopo já delimitado, agrega os valores individuais dos segmentos homogêneos. A Tabela 33 resume todos esses dados, contendo o VPL Estrutural, o VPL Operacional e o índice BBI x Área. Pode-se descrever os parâmetros da seguinte maneira:

- Custo direto: representado pelo VPL Estrutural de cada segmento homogêneo;
- Custo indireto: representado pelo VPL Operacional de cada segmento homogêneo; e
- Custo aos usuários: representado pelo valor do somatório de BBI de todos os anos, em cada segmento homogêneo, multiplicado pela respectiva área.

Tabela 33 – Custos e parâmetros da ACCV por segmento homogêneo

Seção	CENÁRIO 1			CENÁRIO 2			CENÁRIO 3		
	VPL Estrutural (R\$)	VPL Operacional (R\$)	BBi x Área	VPL Estrutural (R\$)	VPL Operacional (R\$)	BBi x Área	VPL Estrutural (R\$)	VPL Operacional (R\$)	BBi x Área
R00C1	7.288	26.119	58.084	0,00	18.596,77	59.000	26.990,79	30.799,33	52.211
R05C1	0	18.737	37.559	0,00	13.340,58	37.559	8.291,68	22.094,21	35.592
R05W1	0	11.701	24.408	0,00	8.331,19	24.408	5.178,15	13.797,84	23.179
R05W2	0	11.701	29.548	0,00	8.331,19	29.548	5.907,43	13.797,84	28.028
R10C1	72.025	91.530	233.764	0,00	65.168,73	251.606	575.221,20	107.930,23	54.292
R10W1	23.700	57.204	144.022	0,00	40.728,79	153.149	68.714,02	67.453,63	134.606
R10W2	45.014	57.204	156.825	0,00	40.728,79	167.975	359.498,53	67.453,63	33.954
R15C1	21.282	51.367	126.449	0,00	36.573,20	134.644	61.703,07	60.571,28	117.994
R15W1	10.916	32.106	80.001	0,00	22.859,08	83.100	38.231,36	37.858,43	73.739
R15W2	13.302	32.106	79.033	0,00	22.859,08	83.966	39.375,24	37.858,43	74.138
R20C1	126.670	105.451	375.554	509.186,34	75.080,79	183.530	696.280,23	124.346,23	64.174
R20W1	23.935	65.907	208.606	0,00	46.925,49	216.164	80.222,95	77.716,39	195.921
R20W2	23.935	65.907	221.750	0,00	46.925,49	229.130	78.481,94	77.716,39	209.892
R25C1	328.469	49.746	35.422	312.633,01	35.419,24	42.018	344.580,49	58.660,14	30.314
R25W1	9.898	31.094	118.838	0,00	22.138,69	121.286	33.728,72	36.665,35	112.304
R25W2	10.572	31.094	124.112	0,00	22.138,69	127.113	37.026,52	36.665,35	118.047
R30C1	348.135	50.290	36.137	316.047,84	35.806,12	46.182	368.015,76	59.300,87	29.892
R30W1	12.192	31.431	108.051	0,00	22.378,82	112.234	38.547,98	37.063,04	102.680
R30W2	10.687	31.431	107.364	0,00	22.378,82	110.373	35.041,79	37.063,04	100.785
R35C1	208.962	31.544	24.844	198.236,41	22.458,87	29.012	230.832,53	37.195,61	18.620
R35W1	9.317	19.711	76.174	0,00	14.034,29	80.083	24.233,57	23.243,11	73.355
R35W2	31.986	19.711	72.425	115.977,61	14.034,29	20.145	130.577,78	23.243,11	12.699
R40C1	1.211.010	182.807	142.699	1.148.852,73	130.157,37	168.519	1.277.957,43	215.562,19	117.833
R40W1	47.335	114.248	398.545	0,00	81.344,19	416.430	134.218,73	134.719,46	381.231
R40W2	47.335	114.248	367.441	0,00	81.344,19	385.127	134.218,73	134.719,46	350.132
R45C1	5.965	18.737	61.815	0,00	13.340,58	63.288	19.890,78	22.094,21	58.150
R45W1	3.490	11.711	36.424	0,00	8.337,86	37.124	12.101,32	13.808,88	34.081
R45W2	3.728	11.711	37.069	0,00	8.337,86	37.991	12.702,89	13.808,88	34.609
R50C1	-13.640	-43.024	145.152	0,00	32.584,37	147.891	47.291,97	53.965,12	135.996
TOTAL	2.643.509,57	1.333.529,06	3.668.116	2.600.933,94	1.012.683,45	3.598.596	4.925.063,59	1.677.171,70	2.808.449

5.2.4 Análise do Ciclo de Vida

A análise do ciclo de vida (ACV) prevista no modelo já teve o seu objetivo e escopo bem estabelecido no item 4.2.4. Deve-se, agora, envidar esforços para a montagem do inventário do ciclo de vida (ICV). Para tal, o *software Simapro*, com as bases de dados *Ecoinvent*, foi utilizado para auxiliar essa tarefa. Para essa aplicação, foram adotadas as distâncias médias de transporte da Tabela 34.

Tabela 34 – Distâncias médias de transporte (DMT) adotadas no estudo de caso

INSUMO	DMT (km)
Britas e Areias	15
Materiais betuminosos virgens	736
Cal hidratada	30
Material retirado da pista	5
Concreto asfáltico	30

As seguintes composições foram utilizadas na modelagem dos insumos dos tipos de M&R utilizados:

- Brita: *Gravel, crushed {RoW}| market for gravel, crushed | APOS, S;*
- Areia: *Sand {GLO}| market for | APOS, S;*
- Cal: *Lime, hydrated, packed {RoW}| market for lime, hydrated, packed | APOS, S;*
- Emulsão asfáltica: *Pitch {RoW}| market for pitch | Cut-off, U (75%) e Non-ionic surfactant {GLO}| market for non-ionic surfactant | Cut-off, U (25%);*
- CAP Modificado por Polímero: *Pitch {RoW}| market for pitch | Cut-off, U (97%) e Acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer {GLO}| market for | Cut-off, U (3%); e*
- Emulsão asfáltica Modificado por Polímero: *Emulsão asfáltica (97%) e Acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer {GLO}| market for | Cut-off, U (3%).*

A primeira parte da montagem do inventário é a quantificação dos insumos necessários aos serviços de M&R. Convém separar o combustível dos transportes dos insumos e aquele utilizado nos equipamentos de engenharia. A Tabela 35 traz essas quantidades necessárias para os serviços por unidade de área (m²).

Tabela 35 – Quantidade de insumos necessários para M&R, por unidade de área (m²)

INSUMO	UND	M&R			
		MCL	MC	RES	MCA
Brita 0	m ³	0,0004	0,0009	0,0100	0,0042
Areia média	m ³	0,0025	0,0046	0,0462	0,0197
Gasolina	l	0,0012	0,0024	0,0000	0,0004
Diesel	l	0,1721	0,2140	0,5318	0,3226
Diesel (Transportes)	l	0,0437	0,0797	0,8092	0,3261
Cal hidratada	kg	0,3566	0,7132	8,0830	3,3521
Pedrisco	m ³	0,0007	0,0014	0,0154	0,0064
Óleo combustível 1A	l	0,0432	0,0864	0,9792	0,4061
Emulsão asfáltica RR-1C	t	0,0000	0,0000	0,0005	0,0005
CAP modificado por polímero 60-85-E	t	0,0003	0,0006	0,0069	0,0029
Material retirado da pista - revestimento asfáltico	m ³	0,0023	0,0045	-	-
Emulsão asfáltica RR-1C com polímero	t	0,0003	0,0003	-	0,0003

A partir dessa fase, é possível comparar as emissões, os mapas de fluxo e os impactos ambientais. Em primeira análise, utilizando o método de cálculo CML-IA, os impactos ambientais podem ser apresentados em seu estado bruto ou de maneira normalizada (normalmente comparado com algum outro período histórico, como, por exemplo, Mundo em 2000 ou Holanda em 1997). Nessa última forma, os dados podem ser comparados entre si ou apresentados conjuntamente. A forma normalizada para o Mundo em 2000 (World 2000) está apresentada na Figura 28.

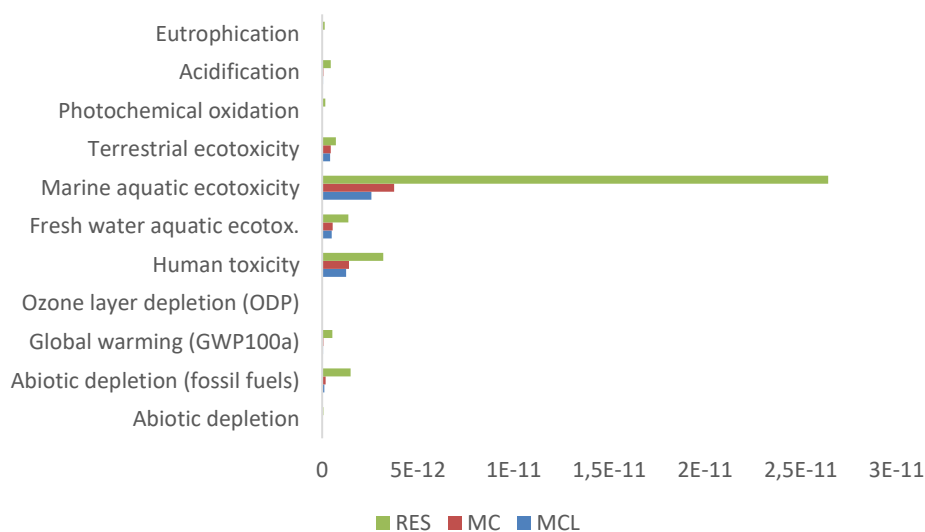


Figura 28 – Impactos ambientais normalizados (World 2000) dos serviços unitários de M&R

Após verificar que o serviço RES está realizando um alto impacto na ecotoxicidade aquática marinha em relação aos demais, pode-se montar um mapa de fluxos nesse quesito para a averiguação dos processos mais contributivos. Nesse serviço RES, observa-se na Figura 29 que o CAP modificado por polímero é o agente de maior contribuição nesse processo desse impacto ambiental.

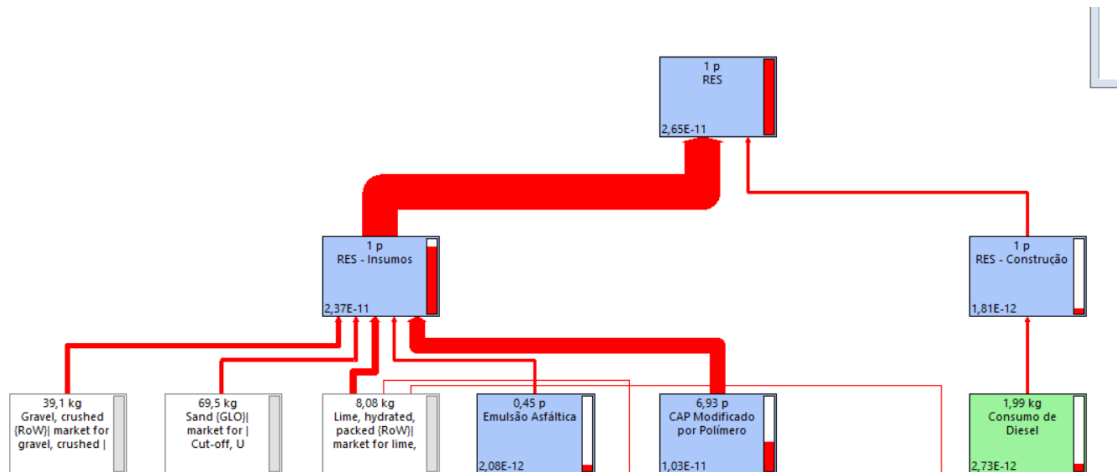


Figura 29 – Mapa de fluxos para a ecotoxicidade aquática marinha no serviço RES

Também está mostrado na Figura 30 um exemplo de impactos ambientais calculados para a integralidade dos cenários 1, 2 e 3. Esse formato permite a comparação imediata do que realmente será realizado em virtude dos planos de M&R em análise.

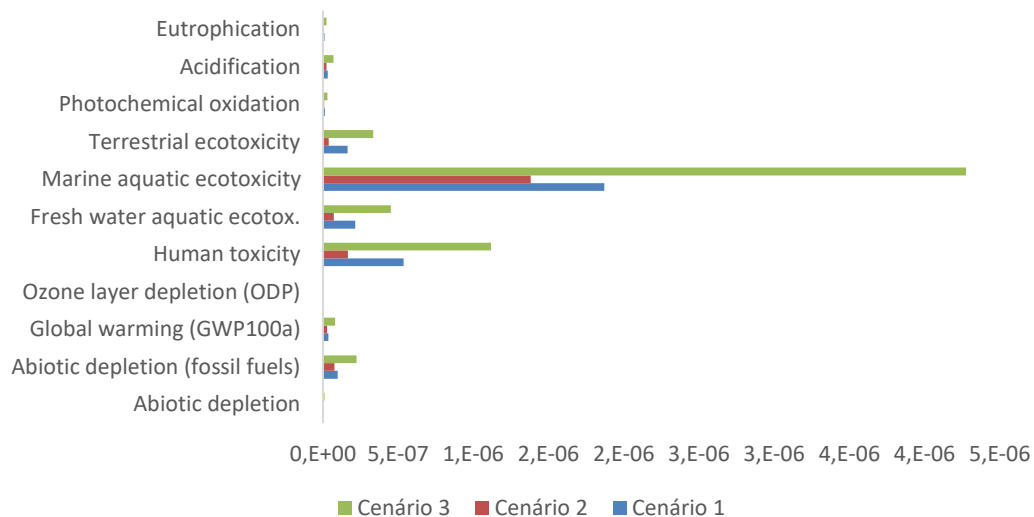


Figura 30 – Impactos ambientais normalizados (World 2000) dos cenários completos de M&R

Para o método em si, deve-se calcular os dados referentes a todos os impactos ambientais do método CML-IA, para cada cenário em análise. Muitos deles tendem a uma forte correlação com outros, mas a própria rotina de seleção de variáveis encarregar-se-á de eliminar essas discrepâncias. Para atribuir determinado impacto ambiental a um segmento homogêneo, basta multiplicar os impactos unitários (Figura 28) à quantidade de área a sofrer intervenção, para cada tipo de M&R, em cada cenário. Esse procedimento está demonstrado na Tabela 36, na Tabela 37 e na Tabela 38.

Tabela 36 – Impactos ambientais calculados para o Cenário 1

Seção	<i>Abiotic depletion</i>	<i>Abiotic depletion (fossil fuels)</i>	<i>Global warming (GWP100a)</i>	<i>Ozone layer depletion (ODP)</i>	<i>Photochemical oxidation</i>	<i>Acidification</i>	<i>Eutrophication</i>
Unidade	kg Sb eq	MJ	kg CO2 eq	kg CFC-11 eq	kg C2H4 eq	kg SO2 eq	kg PO4--- eq
R00C1	4,7E-03	1,3E+05	5,2E+03	1,5E-03	2,0E+00	2,7E+01	6,5E+00
R05C1	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
R05W1	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
R05W2	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
R10C1	2,2E-02	7,0E+05	2,8E+04	8,2E-03	9,7E+00	1,4E+02	3,2E+01
R10W1	1,0E-02	2,8E+05	1,1E+04	3,2E-03	4,3E+00	5,9E+01	1,4E+01
R10W2	1,4E-02	4,4E+05	1,8E+04	5,1E-03	6,0E+00	9,0E+01	2,0E+01
R15C1	9,2E-03	2,5E+05	1,0E+04	2,9E-03	3,9E+00	5,3E+01	1,3E+01
R15W1	5,7E-03	1,6E+05	6,4E+03	1,8E-03	2,4E+00	3,3E+01	7,9E+00
R15W2	5,7E-03	1,6E+05	6,4E+03	1,8E-03	2,4E+00	3,3E+01	7,9E+00
R20C1	4,4E-02	1,3E+06	5,4E+04	1,5E-02	1,9E+01	2,8E+02	6,3E+01
R20W1	1,2E-02	3,2E+05	1,3E+04	3,7E-03	5,0E+00	6,8E+01	1,6E+01
R20W2	1,2E-02	3,2E+05	1,3E+04	3,7E-03	5,0E+00	6,8E+01	1,6E+01
R25C1	7,9E-02	3,2E+06	1,3E+05	3,9E-02	3,6E+01	6,2E+02	1,2E+02
R25W1	5,6E-03	1,5E+05	6,2E+03	1,7E-03	2,4E+00	3,2E+01	7,7E+00
R25W2	5,6E-03	1,5E+05	6,2E+03	1,7E-03	2,4E+00	3,2E+01	7,7E+00
R30C1	8,9E-02	3,5E+06	1,4E+05	4,2E-02	4,1E+01	6,8E+02	1,4E+02
R30W1	5,6E-03	1,5E+05	6,2E+03	1,8E-03	2,4E+00	3,3E+01	7,8E+00
R30W2	5,6E-03	1,5E+05	6,2E+03	1,8E-03	2,4E+00	3,3E+01	7,8E+00
R35C1	5,0E-02	2,0E+06	8,0E+04	2,5E-02	2,3E+01	3,9E+02	7,8E+01
R35W1	3,5E-03	9,6E+04	3,9E+03	1,1E-03	1,5E+00	2,0E+01	4,9E+00
R35W2	1,2E-02	3,4E+05	1,4E+04	4,0E-03	5,1E+00	7,2E+01	1,7E+01
R40C1	2,9E-01	1,2E+07	4,6E+05	1,4E-01	1,3E+02	2,3E+03	4,5E+02
R40W1	2,0E-02	5,6E+05	2,3E+04	6,4E-03	8,6E+00	1,2E+02	2,8E+01
R40W2	2,0E-02	5,6E+05	2,3E+04	6,4E-03	8,6E+00	1,2E+02	2,8E+01
R45C1	3,3E-03	9,1E+04	3,7E+03	1,1E-03	1,4E+00	1,9E+01	4,6E+00
R45W1	2,1E-03	5,7E+04	2,3E+03	6,6E-04	8,9E-01	1,2E+01	2,9E+00
R45W2	2,1E-03	5,7E+04	2,3E+03	6,6E-04	8,9E-01	1,2E+01	2,9E+00
R50C1	8,2E-03	2,2E+05	9,1E+03	2,6E-03	3,5E+00	4,7E+01	1,1E+01

Tabela 37 - Impactos ambientais calculados para o Cenário 2

Seção	<i>Abiotic depletion</i>	<i>Abiotic depletion (fossil fuels)</i>	<i>Global warming (GWP100a)</i>	<i>Ozone layer depletion (ODP)</i>	<i>Photochemical oxidation</i>	<i>Acidification</i>	<i>Eutrophication</i>
Unidade	kg Sb eq	MJ	kg CO2 eq	kg CFC-11 eq	kg C2H4 eq	kg SO2 eq	kg PO4--- eq
R00C1	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
R05C1	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
R05W1	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
R05W2	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
R10C1	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
R10W1	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
R10W2	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
R15C1	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
R15W1	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
R15W2	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
R20C1	1,5E-01	6,3E+06	2,5E+05	7,7E-02	6,9E+01	1,2E+03	2,3E+02
R20W1	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
R20W2	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
R25C1	7,0E-02	3,0E+06	1,2E+05	3,6E-02	3,3E+01	5,7E+02	1,1E+02
R25W1	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
R25W2	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
R30C1	7,1E-02	3,0E+06	1,2E+05	3,7E-02	3,3E+01	5,7E+02	1,1E+02
R30W1	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
R30W2	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
R35C1	4,4E-02	1,9E+06	7,4E+04	2,3E-02	2,1E+01	3,6E+02	7,0E+01
R35W1	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
R35W2	2,8E-02	1,2E+06	4,6E+04	1,4E-02	1,3E+01	2,2E+02	4,4E+01
R40C1	2,6E-01	1,1E+07	4,3E+05	1,3E-01	1,2E+02	2,1E+03	4,0E+02
R40W1	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
R40W2	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
R45C1	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
R45W1	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
R45W2	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
R50C1	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00

Tabela 38 - Impactos ambientais calculados para o Cenário 3

Seção	<i>Abiotic depletion</i>	<i>Abiotic depletion (fossil fuels)</i>	<i>Global warming (GWP100a)</i>	<i>Ozone layer depletion (ODP)</i>	<i>Photochemical oxidation</i>	<i>Acidification</i>	<i>Eutrophication</i>
Unidade	kg Sb eq	MJ	kg CO2 eq	kg CFC-11 eq	kg C2H4 eq	kg SO2 eq	kg PO4--- eq
R00C1	0,0E+00	1,4E-02	3,8E+05	1,6E+04	4,4E-03	5,9E+00	8,1E+01
R05C1	0,0E+00	3,3E-03	9,1E+04	3,7E+03	1,1E-03	1,4E+00	1,9E+01
R05W1	0,0E+00	2,1E-03	5,7E+04	2,3E+03	6,6E-04	8,9E-01	1,2E+01
R05W2	0,0E+00	2,1E-03	5,7E+04	2,3E+03	6,6E-04	8,9E-01	1,2E+01
R10C1	0,0E+00	1,3E-01	5,5E+06	2,1E+05	6,7E-02	6,0E+01	1,0E+03
R10W1	0,0E+00	2,4E-02	7,2E+05	2,9E+04	8,3E-03	1,0E+01	1,5E+02
R10W2	0,0E+00	8,1E-02	3,4E+06	1,3E+05	4,2E-02	3,8E+01	6,5E+02
R15C1	0,0E+00	2,2E-02	6,4E+05	2,6E+04	7,5E-03	9,3E+00	1,3E+02
R15W1	0,0E+00	1,7E-02	4,7E+05	1,9E+04	5,4E-03	7,3E+00	1,0E+02
R15W2	0,0E+00	1,7E-02	4,7E+05	1,9E+04	5,4E-03	7,3E+00	1,0E+02
R20C1	1,5E-01	1,7E-01	6,8E+06	2,7E+05	8,3E-02	7,7E+01	1,3E+03
R20W1	0,0E+00	3,5E-02	9,6E+05	3,9E+04	1,1E-02	1,5E+01	2,1E+02
R20W2	0,0E+00	3,5E-02	9,6E+05	3,9E+04	1,1E-02	1,5E+01	2,1E+02
R25C1	7,0E-02	8,8E-02	3,5E+06	1,4E+05	4,2E-02	4,0E+01	6,7E+02
R25W1	0,0E+00	1,7E-02	4,6E+05	1,9E+04	5,2E-03	7,1E+00	9,7E+01
R25W2	0,0E+00	1,7E-02	4,6E+05	1,9E+04	5,2E-03	7,1E+00	9,7E+01
R30C1	7,1E-02	9,8E-02	3,8E+06	1,5E+05	4,5E-02	4,4E+01	7,3E+02
R30W1	0,0E+00	1,7E-02	4,6E+05	1,9E+04	5,3E-03	7,1E+00	9,8E+01
R30W2	0,0E+00	1,7E-02	4,6E+05	1,9E+04	5,3E-03	7,1E+00	9,8E+01
R35C1	4,4E-02	6,1E-02	2,4E+06	9,3E+04	2,8E-02	2,8E+01	4,6E+02
R35W1	0,0E+00	8,3E-03	2,5E+05	1,0E+04	2,9E-03	3,6E+00	5,2E+01
R35W2	2,8E-02	3,1E-02	1,3E+06	5,0E+04	1,5E-02	1,4E+01	2,5E+02
R40C1	2,6E-01	3,2E-01	1,3E+07	5,0E+05	1,5E-01	1,5E+02	2,5E+03
R40W1	0,0E+00	4,8E-02	1,4E+06	5,8E+04	1,7E-02	2,1E+01	3,0E+02
R40W2	0,0E+00	4,8E-02	1,4E+06	5,8E+04	1,7E-02	2,1E+01	3,0E+02
R45C1	0,0E+00	1,0E-02	2,7E+05	1,1E+04	3,2E-03	4,3E+00	5,8E+01
R45W1	0,0E+00	6,3E-03	1,7E+05	7,0E+03	2,0E-03	2,7E+00	3,6E+01
R45W2	0,0E+00	6,3E-03	1,7E+05	7,0E+03	2,0E-03	2,7E+00	3,6E+01
R50C1	0,0E+00	2,5E-02	6,7E+05	2,7E+04	7,7E-03	1,0E+01	1,4E+02

5.2.5 Sistema de Suporte a Decisão

A última grande etapa do modelo realiza a associação dos custos oriundos da grande etapa de ACCV com os impactos ambientais calculados na grande etapa de ACV. Monta-se, então, o modelo DEA VRS, orientado às saídas. Cada DMU é um segmento homogêneo, em cada cenário estudado. Assim, para n cenários e m segmentos homogêneos, teremos $n \times m$ DMU. O modelo está assim configurado:

- Saídas / produtos do sistema:

- somatório de passageiros movimentados no aeroporto, ano a ano, ponderados pela área da DMU, ou seja, área da DMU / área da pista de pouso; e
- somatório dos índices PCI, ano a ano, multiplicado pela área da DMU (PCI x Área).
- Entradas / insumos do sistema:
 - Custos Diretos (já ponderados para a DMU);
 - Custos Indiretos (já ponderados para a DMU);
 - Custos aos usuários (já ponderados para a DMU); e
 - Impactos ambientais (já ponderados para a DMU).

O pré-tratamento dos dados iniciou-se com a seleção de variáveis. No processo iterativo, incluiu-se de imediato o custo aos usuários (BBI) (menor correlação de Pearson na matriz representada pela Figura 31). O processo iterativo de se buscar o menor número de DMU na fronteira e a maior eficiência média do sistema selecionou outras duas variáveis e estabilizou-se. No final, o sistema foi montado conforme a Figura 32, com duas variáveis representando custos da ACCV ($VPL.TOT = \text{Custos diretos} + \text{custos indiretos}$); e custos aos usuários, representado pelo BBI e outra oriunda da ACV ($ACI = \text{acidification}$).

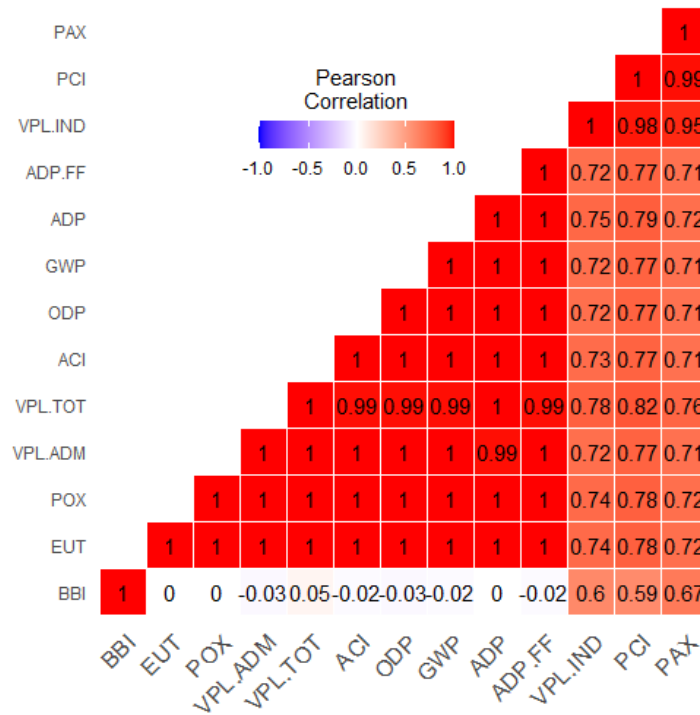


Figura 31 – Matriz de correlação de Pearson das variáveis do estudo de caso

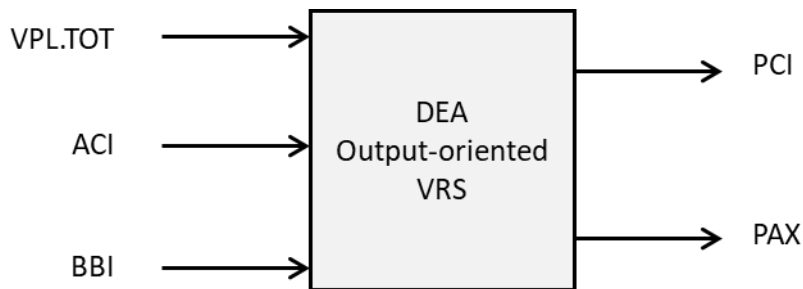


Figura 32 – Sistema DEA escolhido pelo método proposto

As DMU foram analisadas ainda quanto a possíveis *outliers*. Os segmentos homogêneos R40W2, R50C1, R20W2, R20W1 e R40W1 pareciam influenciar as demais seções do pavimento pelo processo de TRAN *et al.* (2010). Porém, as variáveis não foram retiradas do sistema, a fim de se comprovar essa relação por ocasião da construção das fronteiras de eficiência. Em seguida, todas as variáveis de entrada que apresentavam zeros em suas colunas foram transladadas e, posteriormente, normalizadas.

A programação linear do DEA retornou as medidas de eficiência e de ineficiência, possibilitando o cálculo da eficiência composta (Tabela 39). Como cada segmento homogêneo possui três DMU, representando três cenários de M&R, atribuiu-se o plano

de M&R daquela DMU que, dentre essas opções, apresentou a melhor eficiência composta.

Tabela 39 – Medidas de eficiência, ineficiência e eficiência composta encontradas pelo método proposto

DMU	CENÁRIO	EFICIÊNCIA	INEFICIÊNCIA	EFICIÊNCIA COMPOSTA
R00C1	C3	1,000	0,941	0,530
R05C1	C3	1,000	0,947	0,527
R05W1	C3	1,000	1,000	0,500
R05W2	C3	0,852	1,000	0,426
R10C1	C3	1,000	0,940	0,530
R10W1	C3	1,000	0,899	0,550
R10W2	C3	1,000	0,949	0,525
R15C1	C3	1,000	0,901	0,549
R15W1	C3	0,950	0,938	0,506
R15W2	C3	0,926	0,939	0,493
R20C1	C3	0,997	0,965	0,516
R20W1	C3	0,919	0,952	0,483
R20W2	C3	0,883	0,970	0,457
R25C1	C3	0,972	0,985	0,493
R25W1	C3	0,755	0,992	0,381
R25W2	C3	0,724	1,000	0,362
R30C1	C3	0,996	1,000	0,498
R30W1	C3	0,775	0,978	0,398
R30W2	C3	0,798	0,975	0,411
R35C1	C3	1,000	1,000	0,500
R35W1	C3	0,651	1,000	0,325
R35W2	C3	1,000	1,000	0,500
R40C1	C3	1,000	1,000	0,500
R40W1	C3	0,998	1,000	0,499
R40W2	C3	1,000	0,961	0,519
R45C1	C3	0,722	0,986	0,368
R45W1	C3	0,680	1,000	0,340
R45W2	C3	0,670	1,000	0,335
R50C1	C3	0,899	0,957	0,471
R00C1	C1	0,956	0,933	0,511
R05C1	C1	1,000	0,942	0,529
R05W1	C1	1,000	0,997	0,501
R05W2	C1	0,809	1,000	0,405
R10C1	C1	1,000	0,872	0,564
R10W1	C1	0,985	0,902	0,541
R10W2	C1	0,918	0,914	0,502
R15C1	C1	0,989	0,905	0,542
R15W1	C1	0,916	0,928	0,494
R15W2	C1	0,917	0,928	0,494
R20C1	C1	0,882	1,000	0,441
R20W1	C1	0,892	0,938	0,477

R20W2	C1	0,870	0,952	0,459
R25C1	C1	0,936	0,979	0,478
R25W1	C1	0,726	0,989	0,368
R25W2	C1	0,688	1,000	0,344
R30C1	C1	0,907	1,000	0,454
R30W1	C1	0,736	0,972	0,382
R30W2	C1	0,757	0,968	0,394
R35C1	C1	0,917	1,000	0,458
R35W1	C1	0,608	0,995	0,306
R35W2	C1	0,585	1,000	0,293
R40C1	C1	1,000	1,000	0,500
R40W1	C1	0,991	0,997	0,497
R40W2	C1	0,999	0,954	0,522
R45C1	C1	0,682	0,976	0,353
R45W1	C1	0,638	0,999	0,319
R45W2	C1	0,626	1,000	0,313
R50C1	C1	0,896	0,945	0,475
R00C1	C2	1,000	0,926	0,537
R05C1	C2	1,000	0,942	0,529
R05W1	C2	1,000	0,991	0,504
R05W2	C2	1,000	0,994	0,503
R10C1	C2	1,000	0,919	0,541
R10W1	C2	1,000	0,919	0,540
R10W2	C2	1,000	0,947	0,527
R15C1	C2	1,000	0,920	0,540
R15W1	C2	1,000	0,927	0,536
R15W2	C2	1,000	0,936	0,532
R20C1	C2	0,887	1,000	0,443
R20W1	C2	1,000	0,944	0,528
R20W2	C2	1,000	0,957	0,521
R25C1	C2	0,934	0,978	0,478
R25W1	C2	1,000	0,986	0,507
R25W2	C2	1,000	1,000	0,500
R30C1	C2	0,906	1,000	0,453
R30W1	C2	1,000	0,976	0,512
R30W2	C2	1,000	0,968	0,516
R35C1	C2	0,911	1,000	0,455
R35W1	C2	1,000	1,000	0,500
R35W2	C2	0,927	1,000	0,464
R40C1	C2	1,000	1,000	0,500
R40W1	C2	1,000	1,000	0,500
R40W2	C2	1,000	0,961	0,520
R45C1	C2	1,000	0,974	0,513
R45W1	C2	1,000	0,996	0,502
R45W2	C2	1,000	1,000	0,500
R50C1	C2	1,000	0,936	0,532

Para cada segmento homogêneo, as DMU menos eficientes foram retiradas e ele ficou representado pela DMU de maior eficiência. No cenário 1 (PCI mínimo = 70), restaram apenas dois segmentos homogêneos. Outros oito segmentos ficaram com o cenário 3 (PCI mínimo = 85) e a grande maioria permaneceu no cenário 2 (PCI mínimo = 55). A Tabela 40 mostra, em escala de cores (verde representa eficiências mais elevadas, enquanto vermelho representa eficiências mais baixas), esse resultado e o comparativo entre os próprios segmentos homogêneos.

Tabela 40 – Resultado da seleção de cenários de M&R do modelo proposto

SEGMENTO	CENÁRIO 1	CENÁRIO 2	CENÁRIO 3	RESULTADO
R00C1	0,511	0,537	0,530	C2
R05C1	0,529	0,529	0,527	C2
R05W1	0,501	0,504	0,500	C2
R05W2	0,405	0,503	0,426	C2
R10C1	0,564	0,541	0,530	C1
R10W1	0,541	0,540	0,550	C3
R10W2	0,502	0,527	0,525	C2
R15C1	0,542	0,540	0,549	C3
R15W1	0,494	0,536	0,506	C2
R15W2	0,494	0,532	0,493	C2
R20C1	0,441	0,443	0,516	C3
R20W1	0,477	0,528	0,483	C2
R20W2	0,459	0,521	0,457	C2
R25C1	0,478	0,478	0,493	C3
R25W1	0,368	0,507	0,381	C2
R25W2	0,344	0,500	0,362	C2
R30C1	0,454	0,453	0,498	C3
R30W1	0,382	0,512	0,398	C2
R30W2	0,394	0,516	0,411	C2
R35C1	0,458	0,455	0,500	C3
R35W1	0,306	0,500	0,325	C2
R35W2	0,293	0,464	0,500	C3
R40C1	0,500	0,500	0,500	C3
R40W1	0,497	0,500	0,499	C2
R40W2	0,522	0,520	0,519	C1
R45C1	0,353	0,513	0,368	C2
R45W1	0,319	0,502	0,340	C2
R45W2	0,313	0,500	0,335	C2
R50C1	0,475	0,532	0,471	C2

Observando os resultados, nota-se que os segmentos homogêneos mais próximos às cabeceiras (R10C1 e R40W2) apresentaram melhores eficiências no cenário 1 (PCI

mínimo = 70). O cenário 2 (PCI mínimo = 55) ficou composto, em grande maioria, pelos segmentos laterais; as partes centrais que entraram nesse cenário também são localizadas próximas às cabeceiras. Por fim, o cenário 3 (PCI mínimo = 85) foi mais bem adequado às porções mais centralizadas da pista de pouso, onde realmente ocorre o toque em pouso e os esforços de frenagem da aeronave.

Indiretamente, portanto, o modelo realizou uma priorização de atividades de M&R mais contínuas (cenário 3) para as porções que realmente são mais solicitadas em termos da ação do tráfego. Em contrário, as porções laterais da pista (maior parte dos segmentos), sem maiores demandas, exigem menores ações de M&R racionalizando os custos e evitando impactos ambientais advindos da cadeia produtiva dos materiais de construção, transporte e obras.

5.3 Resultados das demais combinações do planejamento do experimento

Diferente do item 5.2, o presente tópico aborda as diferenças de cálculo de cada uma das combinações do planejamento do experimento de uma maneira mais objetiva, a fim de oferecer ao texto uma maior fluidez. Todas as cinco grandes etapas do SGPA proposto foram igualmente aplicadas a cada uma das combinações.

5.3.1 Projeções Estruturais

Os Planos de M&R para as combinações do planejamento de experimento que possuem a estratégia de “atrito adequado” (combinações 1, 4, 5, 8, 9 e 12) incorporam os mesmos serviços e datas previstos da Tabela 19 a Tabela 21. Para as combinações do planejamento de experimento que possuem, como política de intervenção, o “atrito inadequado” (combinações 2, 3, 6, 7, 10 e 11), optou-se por montar um Plano de M&R que substituísse alguma intervenção MCL por MCA nas porções centrais da pista de pouso e decolagem. Essa substituição ocorreu quando não havia nenhuma previsão da intervenção do tipo RES, que já substitui a capa asfáltica. Os cenários 1, 2 e 3, com os respectivos PCI mínimos de 70, 55 e 85, dentro dessa proposta de “atrito inadequado”, estão montados da Tabela 41 a Tabela 43.

Tabela 41 – Plano de M&R para o Cenário 1 (PCI mínimo = 70) – Atrito inadequado

SEGMENTO	SEÇÃO	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
PP-11L_29R	R00C1										MCA
PP-11L_29R	R05C1										MCA
PP-11L_29R	R05W1										
PP-11L_29R	R05W2										
PP-11L_29R	R10C1	MC									MCA
PP-11L_29R	R10W1				MCL						
PP-11L_29R	R10W2	MC									
PP-11L_29R	R15C1				MCA						
PP-11L_29R	R15W1							MCL			
PP-11L_29R	R15W2				MCL						
PP-11L_29R	R20C1	MC			MCA						
PP-11L_29R	R20W1						MCL				
PP-11L_29R	R20W2						MCL				
PP-11L_29R	R25C1	RES							MCL		
PP-11L_29R	R25W1								MCL		
PP-11L_29R	R25W2							MCL			
PP-11L_29R	R30C1	RES						MCL		MCL	
PP-11L_29R	R30W1					MCL					
PP-11L_29R	R30W2							MCL			
PP-11L_29R	R35C1	RES						MCL			
PP-11L_29R	R35W1		MCL								
PP-11L_29R	R35W2	MC	MCL				MCL				
PP-11L_29R	R40C1	RES						MCL			
PP-11L_29R	R40W1				MCL						
PP-11L_29R	R40W2				MCL						
PP-11L_29R	R45C1								MCA		
PP-11L_29R	R45W1									MCL	
PP-11L_29R	R45W2								MCL		
PP-11L_29R	R50C1										MCA

Tabela 42 – Plano de M&R para o Cenário 2 (PCI mínimo = 55) – Atrito inadequado

SEGMENTO	SEÇÃO	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
PP-11L_29R	R00C1										MCA
PP-11L_29R	R05C1										MCA
PP-11L_29R	R05W1										
PP-11L_29R	R05W2										
PP-11L_29R	R10C1										MCA
PP-11L_29R	R10W1										
PP-11L_29R	R10W2										
PP-11L_29R	R15C1										MCA
PP-11L_29R	R15W1										
PP-11L_29R	R15W2										
PP-11L_29R	R20C1						RES				
PP-11L_29R	R20W1										
PP-11L_29R	R20W2										
PP-11L_29R	R25C1	RES									
PP-11L_29R	R25W1										
PP-11L_29R	R25W2										
PP-11L_29R	R30C1	RES									
PP-11L_29R	R30W1										
PP-11L_29R	R30W2										
PP-11L_29R	R35C1	RES									
PP-11L_29R	R35W1										
PP-11L_29R	R35W2		RES								
PP-11L_29R	R40C1	RES									
PP-11L_29R	R40W1										
PP-11L_29R	R40W2										
PP-11L_29R	R45C1										MCA
PP-11L_29R	R45W1										
PP-11L_29R	R45W2										
PP-11L_29R	R50C1										MCA

Tabela 43 – Plano de M&R para o Cenário 3 (PCI mínimo = 85) – Atrito inadequado

SEGMENTO	SEÇÃO	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
PP-11L_29R	R00C1				MCA			MCL			MCL
PP-11L_29R	R05C1			MCA							
PP-11L_29R	R05W1			MCL							
PP-11L_29R	R05W2	MCL									
PP-11L_29R	R10C1	RES									
PP-11L_29R	R10W1	MC			MCL						
PP-11L_29R	R10W2	RES									
PP-11L_29R	R15C1	MC			MCA						
PP-11L_29R	R15W1	MCL				MCL				MCL	
PP-11L_29R	R15W2	MCL		MCL							MCL
PP-11L_29R	R20C1	RES							MCL		
PP-11L_29R	R20W1	MCL			MCL					MCL	
PP-11L_29R	R20W2	MCL				MCL				MCL	
PP-11L_29R	R25C1	RES					MCL				MCL
PP-11L_29R	R25W1			MCL			MCL				MCL
PP-11L_29R	R25W2	MCL				MCL				MCL	
PP-11L_29R	R30C1	RES			MCL			MCL			MCL
PP-11L_29R	R30W1	MCL		MCL							MCL
PP-11L_29R	R30W2		MCL				MCL				MCL
PP-11L_29R	R35C1	RES			MCL			MCL			MCL
PP-11L_29R	R35W1	MC		MCL							
PP-11L_29R	R35W2	RES						MCL			
PP-11L_29R	R40C1	RES				MCL			MCL		
PP-11L_29R	R40W1	MC				MCL					
PP-11L_29R	R40W2	MC				MCL					
PP-11L_29R	R45C1			MCA				MCL			MCL
PP-11L_29R	R45W1				MCL			MCL			MCL
PP-11L_29R	R45W2			MCL			MCL				MCL
PP-11L_29R	R50C1				MCA			MCL			MCL

Com esses novos Planos de M&R, após a inclusão da intervenção MCA, é possível comparar o VPL Estrutural entre cada cenário de PCI mínimo. Mantendo a taxa de desconto de 6,81% ao ano, os valores desse VPL são ilustrados na Figura 33. Lembra-se que essa comparação não conduz ao sistema de decisão do SGPA proposto, mas facilita a visualização da ordem de grandeza entre os graus de exigência quanto ao PCI mínimo do pavimento.

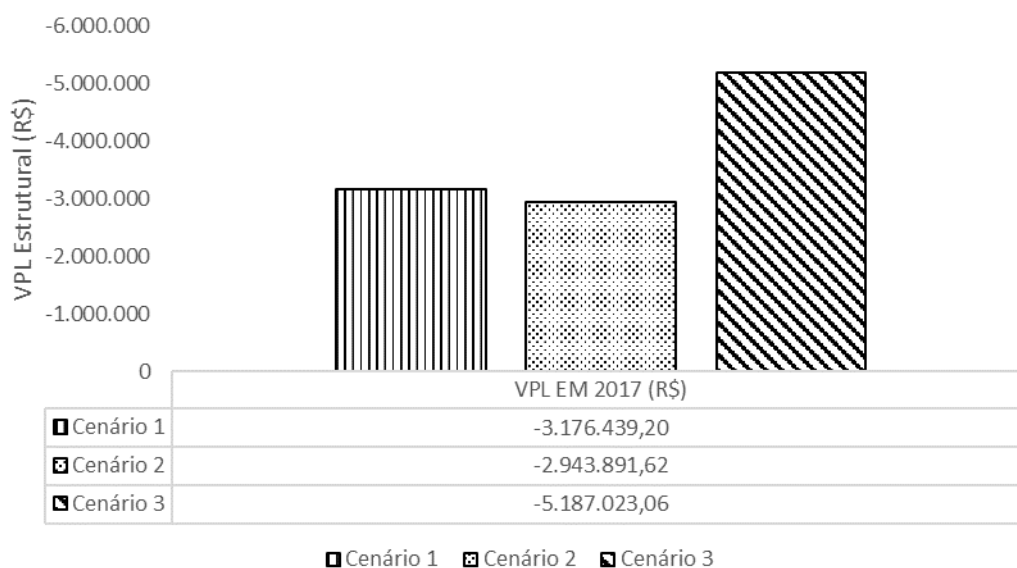


Figura 33 – VPL Estrutural agregado por cenário – Atrito inadequado

5.3.2 Projeções Operacionais

De acordo com o método de SGPA proposto, a fase de projeções operacionais inicia-se com a previsão de demanda. Conforme já apresentado no item 5.2.2, a Figura 25 mostra os valores médios, máximos e mínimos para essa demanda ao longo do tempo. Assim, o cenário otimista é composto pelo limite superior do intervalo de confiança, bem como o pessimista é advindo do limite inferior.

Em seguida, procede-se ao cálculo do tempo de interdição de pista (TIP) (Equação 15 e Equação 16). Esse procedimento já foi realizado para os Planos de M&R compostos pela estratégia de “atrito adequado” (Tabela 28). Com as mesmas produtividades já adotadas em itens anteriores, foi possível sincronizar as intervenções previstas na Tabela 41, na Tabela 42 e na Tabela 43 para o cálculo do TIP nas estratégias de “atrito inadequado”. Esses TIP encontram-se na Tabela 44.

Tabela 44 – Tempo de interdição do pavimento (TIP), em horas – Atrito inadequado

ANO	TIP (horas)		
	CENÁRIO 1	CENÁRIO 2	CENÁRIO 3
2017	76,8	61,1	83,3
2018	14,4	10,2	22,9
2019	0,0	0,0	23,4
2020	94,9	0,0	48,3
2021	22,9	36,9	133,2
2022	48,0	0,0	36,2
2023	133,2	0,0	36,6
2024	36,2	0,0	133,2
2025	43,4	0,0	48,0
2026	82,9	82,9	36,6

Para as combinações do planejamento do experimento que utilizam como regime de trabalho os períodos fora do pico, é necessário determinar o fator C (Equação 16). Ele corresponde ao somatório mínimo de movimentação horária de passageiros dentro do intervalo de tempo diário de interdição da pista de pouso e decolagem, previamente planejado e notificado via NOTAM (TIN). Deve-se então conhecer a movimentação de passageiros realizada durante todo o mês de fevereiro de 2017, que corresponde ao mês de menor movimento no aeroporto. Adotando-se o TIN de 8 horas e observando essa distribuição horária do movimento de passageiros (Figura 34) oriundos da ANAC (2019), verifica-se que o período compreendido entre 00h00 e 07h59 é o mais propício para as intervenções na pista de pouso e decolagem. O fator C é calculado dividindo-se o somatório dos movimentos de passageiros registrados entre 00h00 e 07h59 (125.660 passageiros) pelo movimento total do mês em questão (1.181.326 passageiros). Nesses critérios, o fator C é igual a 10,6%.

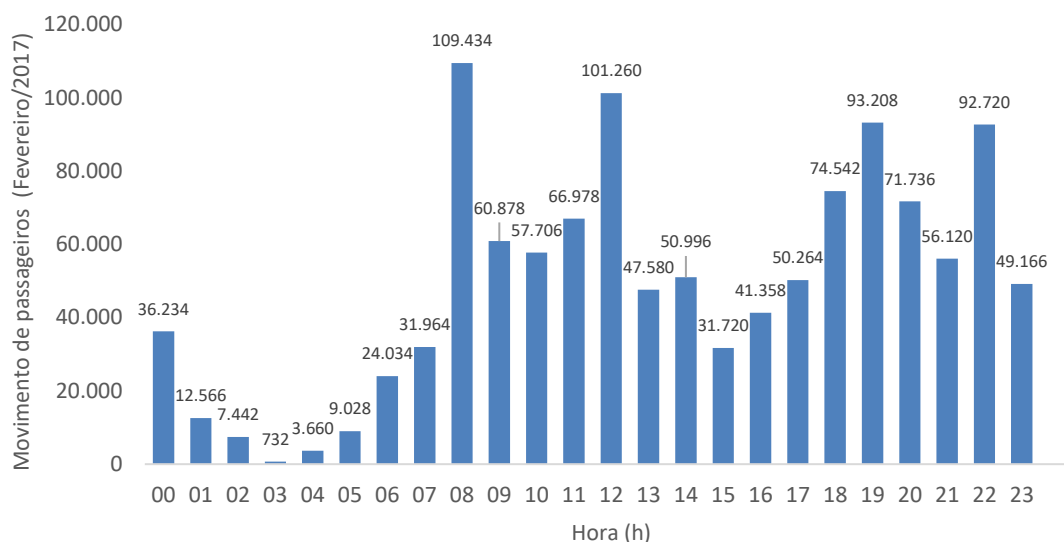


Figura 34 – Distribuição horária do movimento de passageiros do Aeroporto Internacional de Brasília em fevereiro de 2017

Enfim, as perdas de passageiros a cada ano podem ser estimadas por meio da Equação 15 e da Equação 16. Essas perdas refletem uma diminuição do fluxo de caixa do aeroporto. Elabora-se então os fluxos de caixa incremental, assim como foi realizado com a comparação da Tabela 29 – Fluxo de caixa sem qualquer M&R, com a Tabela 30 – Fluxo de caixa do Cenário 1, com a Tabela 31 – Fluxo de caixa do Cenário 2, e com a Tabela 32 – Fluxo de caixa do Cenário 3. Os extratos dos fluxos de caixa apurados para cada caso de previsão de demanda (otimista, pessimista e média) e regime de trabalho (integral e fora de pico) estão dispostos da Tabela 45 a Tabela 48, apresentando o número de passageiros já impactado pelo TIP e o lucro operacional bruto para cada caso.

Tabela 45 – Previsão de demanda de passageiros (PAX) e lucro operacional bruto (LOB) para intervenções do tipo “atrito adequado” e regime de trabalho integral

PREVISÃO DE DEMANDA	CENÁRIO	DADO	ANO										
			2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	
PESSIMISTA	SEM OBRA	PAX	16.737.545	17.810.957	11.250.727	11.759.209	11.261.465	12.021.655	11.083.112	11.132.120	10.632.536	13.472.665	
		LOB (R\$1.000)	14.511,00	22.334,79	-53.413,54	-47.547,14	-53.296,23	-44.521,57	-55.362,26	-54.804,34	-60.578,17	-27.779,52	
	1	PAX	16.626.262	17.803.739	11.250.727	11.731.644	11.254.158	12.005.152	11.041.190	11.120.654	10.621.436	13.465.395	
		LOB (R\$1.000)	13.224,73	22.251,45	-53.413,54	-47.865,12	-53.380,38	-44.711,92	-55.846,02	-54.936,64	-60.706,21	-27.863,43	
	2	PAX	16.626.262	17.791.766	11.250.727	11.759.209	11.217.165	12.021.655	11.083.112	11.132.120	10.632.536	13.472.665	
		LOB (R\$1.000)	13.224,41	22.113,25	-53.413,54	-47.547,14	-53.807,69	-44.521,57	-55.361,66	-54.804,34	-60.578,17	-27.779,46	
	3	PAX	16.626.262	17.799.447	11.243.352	11.743.307	11.218.971	12.009.199	11.071.579	11.089.983	10.617.989	13.458.667	
		LOB (R\$1.000)	13.224,70	22.202,23	-53.498,51	-47.730,59	-53.786,53	-44.665,30	-55.495,26	-55.290,69	-60.745,90	-27.940,85	
	OTIMISTA	SEM OBRA	PAX	16.737.545	17.810.957	17.997.391	20.130.732	20.965.301	22.255.181	23.933.672	27.475.485	29.864.037	27.629.610
			LOB (R\$1.000)	14.511,00	22.334,79	24.502,19	49.133,75	58.771,24	73.663,18	93.046,04	133.941,58	161.522,20	135.715,94
		1	PAX	16.626.262	17.803.739	17.997.391	20.082.579	20.951.560	22.224.420	23.842.169	27.446.989	29.832.604	27.614.429
			LOB (R\$1.000)	13.224,73	22.251,45	24.502,19	48.578,00	58.612,78	73.308,16	91.989,67	133.612,63	161.159,34	135.540,66
2		PAX	16.626.262	17.791.766	17.997.391	20.130.732	20.881.990	22.255.181	23.933.672	27.475.485	29.864.037	27.629.610	
		LOB (R\$1.000)	13.224,41	22.113,25	24.502,19	49.133,75	57.809,25	73.663,18	93.046,64	133.941,58	161.522,20	135.716,00	
3		PAX	16.626.262	17.799.447	17.985.322	20.102.954	20.885.385	22.231.963	23.908.500	27.370.772	29.822.842	27.600.381	
		LOB (R\$1.000)	13.224,70	22.202,23	24.363,02	48.813,13	57.848,77	73.395,16	92.755,52	132.732,57	161.046,73	135.378,70	
MÉDIO		SEM OBRA	PAX	16.737.545	17.810.957	14.624.059	15.944.971	16.113.383	17.138.418	17.508.392	19.303.802	20.248.287	20.551.138
			LOB (R\$1.000)	14.511,00	22.334,79	-14.455,67	793,31	2.737,51	14.570,80	18.841,89	39.568,62	50.472,01	53.968,21
		1	PAX	16.626.262	17.803.739	14.624.059	15.907.112	16.102.859	17.114.786	17.441.680	19.283.822	20.227.020	20.539.912
			LOB (R\$1.000)	13.224,73	22.251,45	-14.455,67	356,44	2.616,20	14.298,12	18.071,82	39.338,00	50.226,57	53.838,61
	2	PAX	16.626.262	17.791.766	14.624.059	15.944.971	16.049.578	17.138.418	17.508.392	19.303.802	20.248.287	20.551.138	
		LOB (R\$1.000)	13.224,41	22.113,25	-14.455,67	793,31	2.000,78	14.570,80	18.842,49	39.568,62	50.472,01	53.968,27	
	3	PAX	16.626.262	17.799.447	14.614.337	15.923.131	16.052.178	17.120.581	17.490.040	19.230.377	20.220.416	20.529.524	
		LOB (R\$1.000)	13.224,70	22.202,23	-14.567,74	541,27	2.031,12	14.364,93	18.630,13	38.720,94	50.150,41	53.718,92	

Tabela 46 – Previsão de demanda de passageiros (PAX) e lucro operacional bruto (LOB) para intervenções do tipo “atrito inadequado” e regime de trabalho fora do pico

PREVISÃO DE DEMANDA	CENÁRIO	DADO	ANO									
			2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
PESSIMISTA	SEM OBRA	PAX	16.737.545	17.810.957	11.250.727	11.759.209	11.261.465	12.021.655	11.083.112	11.132.120	10.632.536	13.472.665
		LOB (R\$1.000)	14.511,00	22.334,79	-53.413,54	-47.547,14	-53.296,23	-44.521,57	-55.362,26	-54.804,34	-60.578,17	-27.779,52
	1	PAX	16.693.027	17.802.325	11.250.727	11.721.651	11.252.727	12.001.920	11.032.980	11.118.408	10.616.804	13.434.815
		LOB (R\$1.000)	13.996,49	22.235,13	-53.413,54	-47.980,52	-53.396,91	-44.749,25	-55.940,84	-54.962,57	-60.759,70	-28.216,60
	2	PAX	16.702.157	17.804.854	11.250.727	11.759.209	11.247.377	12.021.655	11.083.112	11.132.120	10.632.536	13.434.815
		LOB (R\$1.000)	14.101,72	22.264,40	-53.413,54	-47.547,14	-53.458,78	-44.521,57	-55.361,66	-54.804,34	-60.578,17	-28.216,58
	3	PAX	16.689.313	17.797.193	11.241.907	11.740.101	11.210.648	12.006.759	11.069.320	11.081.729	10.615.140	13.455.925
		LOB (R\$1.000)	13.953,54	22.176,20	-53.515,19	-47.767,61	-53.882,65	-44.693,48	-55.521,35	-55.386,00	-60.778,81	-27.972,51
	OTIMISTA	SEM OBRA	PAX	16.737.545	17.810.957	17.997.391	20.130.732	20.965.301	22.255.181	23.933.672	27.475.485	29.864.037
LOB (R\$1.000)			14.511,00	22.334,79	24.502,19	49.133,75	58.771,24	73.663,18	93.046,04	133.941,58	161.522,20	135.715,94
1		PAX	16.693.027	17.802.325	17.997.391	20.065.122	20.948.869	22.218.396	23.824.247	27.441.408	29.819.488	27.550.575
		LOB (R\$1.000)	13.996,49	22.235,13	24.502,19	48.376,39	58.581,70	73.238,59	91.782,69	133.548,18	161.007,88	134.803,22
2		PAX	16.702.157	17.804.854	17.997.391	20.130.732	20.938.808	22.255.181	23.933.672	27.475.485	29.864.037	27.550.575
		LOB (R\$1.000)	14.101,72	22.264,40	24.502,19	49.133,75	58.465,43	73.663,18	93.046,64	133.941,58	161.522,20	134.803,23
3		PAX	16.689.313	17.797.193	17.982.958	20.097.354	20.869.733	22.227.416	23.903.570	27.350.263	29.814.774	27.594.656
		LOB (R\$1.000)	13.953,54	22.176,20	24.335,72	48.748,46	57.668,00	73.342,64	92.698,58	132.495,72	160.953,55	135.312,58
MÉDIO		SEM OBRA	PAX	16.737.545	17.810.957	14.624.059	15.944.971	16.113.383	17.138.418	17.508.392	19.303.802	20.248.287
	LOB (R\$1.000)		14.511,00	22.334,79	-14.455,67	793,31	2.737,51	14.570,80	18.841,89	39.568,62	50.472,01	53.968,21
	1	PAX	16.693.027	17.802.325	14.624.059	15.893.387	16.100.798	17.110.158	17.428.614	19.279.908	20.218.146	20.492.695
		LOB (R\$1.000)	13.996,49	22.235,13	-14.455,67	197,93	2.592,40	14.244,67	17.920,92	39.292,80	50.124,09	53.293,31
	2	PAX	16.702.157	17.804.854	14.624.059	15.944.971	16.093.093	17.138.418	17.508.392	19.303.802	20.248.287	20.492.695
		LOB (R\$1.000)	14.101,72	22.264,40	-14.455,67	793,31	2.503,32	14.570,80	18.842,49	39.568,62	50.472,01	53.293,32
	3	PAX	16.689.313	17.797.193	14.612.433	15.918.727	16.040.191	17.117.087	17.486.445	19.215.996	20.214.957	20.525.291
		LOB (R\$1.000)	13.953,54	22.176,20	-14.589,74	490,42	1.892,68	14.324,58	18.588,61	38.554,86	50.087,37	53.670,04

Tabela 47 – Previsão de demanda de passageiros (PAX) e lucro operacional bruto (LOB) para intervenções do tipo “atrito adequado” e regime de trabalho fora do pico

PREVISÃO DE DEMANDA	CENÁRIO	DADO	ANO									
			2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
PESSIMISTA	SEMOBRA	PAX	16.737.545	17.810.957	11.250.727	11.759.209	11.261.465	12.021.655	11.083.112	11.132.120	10.632.536	13.472.665
		LOB (R\$1.000)	14.511,00	22.334,79	-53.413,54	-47.547,14	-53.296,23	-44.521,57	-55.362,26	-54.804,34	-60.578,17	-27.779,52
	1	PAX	16.702.157	17.808.662	11.250.727	11.750.443	11.259.141	12.016.407	11.069.781	11.128.474	10.629.007	13.470.353
		LOB (R\$1.000)	14.102,03	22.308,31	-53.413,54	-47.648,01	-53.322,84	-44.581,94	-55.515,84	-54.846,32	-60.618,78	-27.806,17
	2	PAX	16.702.157	17.804.854	11.250.727	11.759.209	11.247.377	12.021.655	11.083.112	11.132.120	10.632.536	13.472.665
		LOB (R\$1.000)	14.101,72	22.264,40	-53.413,54	-47.547,14	-53.458,78	-44.521,57	-55.361,66	-54.804,34	-60.578,17	-27.779,46
	3	PAX	16.702.157	17.807.297	11.248.382	11.754.152	11.247.952	12.017.694	11.079.444	11.118.721	10.627.910	13.468.213
		LOB (R\$1.000)	14.102,01	22.292,89	-53.440,42	-47.605,35	-53.451,84	-44.567,19	-55.404,43	-54.958,80	-60.631,32	-27.830,60
	OTIMISTA	SEM OBRA	PAX	16.737.545	17.810.957	17.997.391	20.130.732	20.965.301	22.255.181	23.933.672	27.475.485	29.864.037
LOB (R\$1.000)			14.511,00	22.334,79	24.502,19	49.133,75	58.771,24	73.663,18	93.046,04	133.941,58	161.522,20	135.715,94
1		PAX	16.702.157	17.808.662	17.997.391	20.115.420	20.960.931	22.245.399	23.904.574	27.466.423	29.854.041	27.624.783
		LOB (R\$1.000)	14.102,03	22.308,31	24.502,19	48.957,27	58.721,01	73.550,44	92.710,37	133.837,06	161.406,92	135.660,23
2		PAX	16.702.157	17.804.854	17.997.391	20.130.732	20.938.808	22.255.181	23.933.672	27.475.485	29.864.037	27.629.610
		LOB (R\$1.000)	14.101,72	22.264,40	24.502,19	49.133,75	58.465,43	73.663,18	93.046,64	133.941,58	161.522,20	135.716,00
3		PAX	16.702.157	17.807.297	17.993.553	20.121.899	20.939.888	22.247.798	23.925.668	27.442.186	29.850.937	27.620.315
		LOB (R\$1.000)	14.102,01	22.292,89	24.458,08	49.031,93	58.478,20	73.578,03	92.953,78	133.557,31	161.371,19	135.608,92
MÉDIO		SEM OBRA	PAX	16.737.545	17.810.957	14.624.059	15.944.971	16.113.383	17.138.418	17.508.392	19.303.802	20.248.287
	LOB (R\$1.000)		14.511,00	22.334,79	-14.455,67	793,31	2.737,51	14.570,80	18.841,89	39.568,62	50.472,01	53.968,21
	1	PAX	16.702.157	17.808.662	14.624.059	15.932.931	16.110.036	17.130.903	17.487.177	19.297.449	20.241.524	20.547.568
		LOB (R\$1.000)	14.102,03	22.308,31	-14.455,67	654,63	2.699,09	14.484,25	18.597,27	39.495,37	50.394,07	53.927,03
	2	PAX	16.702.157	17.804.854	14.624.059	15.944.971	16.093.093	17.138.418	17.508.392	19.303.802	20.248.287	20.551.138
		LOB (R\$1.000)	14.101,72	22.264,40	-14.455,67	793,31	2.503,32	14.570,80	18.842,49	39.568,62	50.472,01	53.968,27
	3	PAX	16.702.157	17.807.297	14.620.967	15.938.025	16.093.920	17.132.746	17.502.556	19.280.453	20.239.424	20.544.264
		LOB (R\$1.000)	14.102,01	22.292,89	-14.491,17	713,29	2.513,18	14.505,42	18.774,68	39.299,26	50.369,93	53.889,16

Tabela 48 – Previsão de demanda de passageiros (PAX) e lucro operacional bruto (LOB) para intervenções do tipo “atrito inadequado” e regime de trabalho integral

PREVISÃO DE DEMANDA	CENÁRIO	DADO	ANO										
			2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	
PESSIMISTA	SEM OBRA	PAX	16.737.545	17.810.957	11.250.727	11.759.209	11.261.465	12.021.655	11.083.112	11.132.120	10.632.536	13.472.665	
		LOB (R\$1.000)	14.511,00	22.334,79	-53.413,54	-47.547,14	-53.296,23	-44.521,57	-55.362,26	-54.804,34	-60.578,17	-27.779,52	
	1	PAX	16.597.551	17.783.813	11.250.727	11.641.104	11.233.989	11.959.595	10.925.465	11.088.999	10.583.065	13.353.639	
		LOB (R\$1.000)	12.892,84	22.021,33	-53.413,54	-48.910,75	-53.613,31	-45.238,06	-57.182,51	-55.302,21	-61.149,35	-29.154,08	
	2	PAX	16.626.262	17.791.766	11.250.727	11.759.209	11.217.165	12.021.655	11.083.112	11.132.120	10.632.536	13.353.639	
		LOB (R\$1.000)	13.224,41	22.113,25	-53.413,54	-47.547,14	-53.807,69	-44.521,57	-55.361,66	-54.804,34	-60.578,17	-29.154,06	
	3	PAX	16.585.873	17.767.673	11.222.992	11.699.123	11.101.664	11.974.812	11.039.743	10.973.658	10.577.830	13.420.025	
		LOB (R\$1.000)	12.757,82	21.835,28	-53.733,64	-48.240,86	-55.141,28	-45.062,43	-55.862,93	-56.634,09	-61.209,69	-28.387,12	
	OTIMISTA	SEM OBRA	PAX	16.737.545	17.810.957	17.997.391	20.130.732	20.965.301	22.255.181	23.933.672	27.475.485	29.864.037	27.629.610
			LOB (R\$1.000)	14.511,00	22.334,79	24.502,19	49.133,75	58.771,24	73.663,18	93.046,04	133.941,58	161.522,20	135.715,94
		1	PAX	16.597.551	17.783.813	17.997.391	19.924.411	20.913.629	22.139.504	23.589.568	27.368.327	29.723.947	27.381.070
			LOB (R\$1.000)	12.892,84	22.021,33	24.502,19	46.751,35	58.174,72	72.327,49	89.072,43	132.704,18	159.904,49	132.845,65
2		PAX	16.626.262	17.791.766	17.997.391	20.130.732	20.881.990	22.255.181	23.933.672	27.475.485	29.864.037	27.381.070	
		LOB (R\$1.000)	13.224,41	22.113,25	24.502,19	49.133,75	57.809,25	73.663,18	93.046,64	133.941,58	161.522,20	132.845,66	
3		PAX	16.585.873	17.767.673	17.952.004	20.025.767	20.664.774	22.167.869	23.839.010	27.081.706	29.709.124	27.519.691	
		LOB (R\$1.000)	12.757,82	21.835,28	23.978,25	47.921,72	55.300,97	72.654,94	91.952,99	129.394,21	159.733,42	134.446,83	
MÉDIO		SEM OBRA	PAX	16.737.545	17.810.957	14.624.059	15.944.971	16.113.383	17.138.418	17.508.392	19.303.802	20.248.287	20.551.138
			LOB (R\$1.000)	14.511,00	22.334,79	-14.455,67	793,31	2.737,51	14.570,80	18.841,89	39.568,62	50.472,01	53.968,21
		1	PAX	16.597.551	17.783.813	14.624.059	15.782.757	16.073.809	17.049.550	17.257.516	19.228.663	20.153.506	20.367.355
			LOB (R\$1.000)	12.892,84	22.021,33	-14.455,67	-1.079,70	2.280,71	13.544,72	15.944,96	38.700,98	49.377,57	51.845,79
	2	PAX	16.626.262	17.791.766	14.624.059	15.944.971	16.049.578	17.138.418	17.508.392	19.303.802	20.248.287	20.367.355	
		LOB (R\$1.000)	13.224,41	22.113,25	-14.455,67	793,31	2.000,78	14.570,80	18.842,49	39.568,62	50.472,01	51.845,80	
	3	PAX	16.585.873	17.767.673	14.587.498	15.862.445	15.883.219	17.071.340	17.439.376	19.027.682	20.143.477	20.469.858	
		LOB (R\$1.000)	12.757,82	21.835,28	-14.877,70	-159,57	79,85	13.796,26	18.045,03	36.380,06	49.261,86	53.029,86	

A partir dessas diferenças entre os fluxos de caixa sem obra e os fluxos de caixa para cada cenário, os fluxos de caixa incremental são calculados. Esses custos indiretos advindos do impacto na operação do aeroporto são atribuídos, então, para cada segmento homogêneo, ano a ano, proporcionalmente ao peso relativo de suas áreas em relação à área total do pavimento.

5.3.3 Análise de Custo do Ciclo de Vida

Na etapa de análise de custo do ciclo de vida, o método proposto prevê a distribuição dos custos diretos (custos da administração), dos custos indiretos (custos do impacto da interdição da pista de pouso e decolagem) e dos custos dos usuários (BBI) para cada segmento homogêneo, proporcionalmente às suas áreas. Os dados consolidados das projeções estruturais e operacionais, que compõem a presente análise, estão apresentados na Tabela 49.

Com os dados tabelados, fica evidente que os custos diretos da administração (VPL Estrutural) e os custos aos usuários (BBI x Área) variam apenas com a política de intervenção adotada. Em contrapartida, os custos indiretos advindos da interdição da pista de pouso e decolagem sofrem influência de todos os três fatores do planejamento do experimento. A mudança da política de intervenção altera o tempo necessário para a realização dos serviços de M&R. Esses, por sua vez, podem ser cumpridos em tempo integral ou apenas nos períodos fora do pico, o que altera a movimentação horária dos passageiros. Por fim, o cenário de previsão de demanda (média, otimista ou pessimista) fornece o ritmo de crescimento desses custos indiretos, ou seja, quanto maior a previsão da demanda, maior será a frustração das receitas quando da necessidade de interdição da pista de pouso.

Tabela 49 – Custos diretos, indiretos e dos usuários da ACCV calculados para cada uma das combinações de fatores do planejamento do experimento, dentro dos cenários propostos

POLÍTICA DE INTERVENÇÃO	REGIME DE TRABALHO	DADO	PREVISÃO DE DEMANDA								
			PESSIMISTA			OTIMISTA			MÉDIO		
			CENÁRIO 1	CENÁRIO 2	CENÁRIO 3	CENÁRIO 1	CENÁRIO 2	CENÁRIO 3	CENÁRIO 1	CENÁRIO 2	CENÁRIO 3
Atrito Adequado	Integral	VPL Estrutural (R\$)	2.670.789	2.600.934	4.925.064	2.670.789	2.600.934	4.925.064	2.670.789,02	2.600.933,94	4.925.063,59
		VPL Operacional (R\$)	1.159.404	927.582	1.327.535	1.685.232	1.097.785	2.026.809	1.422.318,02	1.012.683,45	1.677.171,70
		BBI x Área	3.668.116	3.598.596	2.808.449	3.668.116	3.598.596	2.808.449	3.668.115,50	3.598.595,81	2.808.448,67
Atrito Inadequado	Fora do pico	VPL Estrutural (R\$)	3.176.439,20	2.943.891,62	5.187.023,06	3.176.439,20	2.943.891,62	5.187.023,06	3.176.439,20	2.943.891,62	5.187.023,06
		VPL Operacional (R\$)	1.004.409,27	413.622,40	1.105.910,97	1.763.873,47	597.005,87	1.942.461,56	1.384.141,37	505.314,14	1.524.186,26
		BBI x Área	3.664.638,73	3.596.123,23	2.808.448,67	3.664.638,73	3.596.123,23	2.808.448,67	3.664.638,73	3.596.123,23	2.808.448,67
Atrito Inadequado	Integral	VPL Estrutural (R\$)	3.176.439,20	2.943.891,62	5.187.023,06	3.176.439,20	2.943.891,62	5.187.023,06	3.176.439,20	2.943.891,62	5.187.023,06
		VPL Operacional (R\$)	3.159.802,38	1.301.138,92	3.479.649,31	5.548.054,60	1.877.816,52	6.110.311,53	4.353.928,49	1.589.477,72	4.794.980,42
		BBI x Área	3.664.638,73	3.596.123,23	2.808.448,67	3.664.638,73	3.596.123,23	2.808.448,67	3.664.638,73	3.596.123,23	2.808.448,67
Atrito Adequado	Fora do pico	VPL Estrutural (R\$)	2.670.789,02	2.600.933,94	4.925.063,59	2.670.789,02	2.600.933,94	4.925.063,59	2.670.789,02	2.600.933,94	4.925.063,59
		VPL Operacional (R\$)	368.282,73	294.831,20	421.538,55	535.495,76	348.955,92	643.907,63	451.889,24	321.893,56	532.723,09
		BBI x Área	3.668.115,50	3.598.595,81	2.808.448,67	3.668.115,50	3.598.595,81	2.808.448,67	3.668.115,50	3.598.595,81	2.808.448,67

5.3.4 Análise do Ciclo de Vida

Nessa fase de análise do ciclo de vida, procura-se estabelecer o objetivo e escopo (já delimitados no item 4.2.4), montar o inventário do ciclo de vida (Tabela 35 e banco de dados *Ecoinvent*) e calcular os impactos pelo método CML-IA, normalizados pela referência *World 2000*.

Em virtude da natureza dos cálculos dos impactos ambientais, já se pode deduzir que eles não variam com o regime de trabalho (integral ou fora do pico) adotado ou com a previsão de demanda (média, otimista e pessimista). Como o inventário do ciclo de vida é montado com base nos insumos utilizados nos serviços de M&R e nas horas de trabalho dos equipamentos de engenharia, apenas a política de intervenção (atrito adequado e atrito inadequado) exerce influência sobre essa fase. Na Tabela 50, verifica-se, por oportuno, que as políticas de intervenção de atrito inadequado causam maior impacto ambiental que aquelas de atrito adequado. Tal fato é explicado pela necessidade imposta por ocasião da montagem dos Planos de M&R para atrito inadequado, que incorporam, pelo menos uma vez no período de dez anos, a requalificação funcional de atrito do revestimento asfáltico com camada porosa de atrito (CPA).

Tabela 50 – Impactos ambientais normalizados (*World 2000*) calculados por políticas de intervenção de M&R do estudo de caso

POLÍTICA DE INTERVENÇÃO	IMPACTO	CENÁRIO 1	CENÁRIO 2	CENÁRIO 3
Atrito Adequado	<i>Abiotic depletion (ADP)</i>	3,55E-09	2,96E-09	6,55E-09
	<i>Abiotic depletion (fossil fuels) (ADP-FF)</i>	7,18E-08	6,94E-08	1,33E-07
	<i>Global warming (GWP100a)</i>	2,58E-08	2,46E-08	4,76E-08
	<i>Ozone layer depletion (ODP)</i>	1,44E-09	1,41E-09	2,66E-09
	<i>Photochemical oxidation (POX)</i>	9,09E-09	7,86E-09	1,68E-08
	<i>Acidification (ACI)</i>	2,25E-08	2,10E-08	4,15E-08
	<i>Eutrophication (EUT)</i>	7,05E-09	6,15E-09	1,30E-08
Atrito Inadequado	<i>Abiotic depletion (ADP)</i>	4,68E-09	3,91E-09	7,01E-09
	<i>Abiotic depletion (fossil fuels) (ADP-FF)</i>	9,54E-08	8,82E-08	1,43E-07
	<i>Global warming (GWP100a)</i>	3,38E-08	3,11E-08	5,10E-08
	<i>Ozone layer depletion (ODP)</i>	1,91E-09	1,79E-09	2,86E-09
	<i>Photochemical oxidation (POX)</i>	1,21E-08	1,03E-08	1,80E-08
	<i>Acidification (ACI)</i>	2,95E-08	2,67E-08	4,44E-08
	<i>Eutrophication (EUT)</i>	9,22E-09	7,96E-09	1,39E-08

5.3.5 Sistema de Suporte a Decisão

Na última grande etapa do método, é aplicado um sistema de suporte a decisão com base na modelagem DEA VRS apresentada no item 4.2.5. Basicamente, agrega-se as informações oriundas da análise de custo do ciclo de vida (Tabela 49) e da análise do ciclo de vida (Tabela 50) como dados de entrada ao sistema. Como saída do processo, foram adotados o movimento de passageiros e o PCI após as intervenções.

Na fase de pré-tratamento dos dados, realiza-se a seleção das variáveis pelo método descrito no item 4.2.5, com foco no menor número de DMU na fronteira e maior eficiência geral do sistema. Seguindo esse critério, a Tabela 51 apresenta as variáveis de entrada do sistema. Observa-se que o processo de seleção se estabilizou, ou seja, não melhorou a eficiência geral do sistema, com a incorporação de mais uma variável,

totalizando de duas a quatro variáveis na entrada. Em geral, quanto maior o volume de passageiros previstos, maior a necessidade do sistema em incorporar mais variáveis de entrada. Em análise qualitativa, verifica-se que, nas políticas de intervenção de atrito inadequado, as variáveis de custo do ciclo de vida (VPL.TOT = custos diretos + custos indiretos; VPL.ADM = custos diretos) dominaram o sistema, independente do regime de trabalho. Nas combinações compostas por políticas de intervenção do tipo atrito adequado, foi possível observar que o regime de trabalho fora do pico demandou menos variáveis para a composição do sistema, com menor ênfase aos custos diretos e indiretos e maior protagonismo dos impactos do ciclo de vida e dos custos aos usuários (ACI = *acidification*; BBI = custos aos usuários; ADP = *abiotic depletion*).

Tabela 51 – Variáveis de entrada selecionadas para o sistema DEA VRS do estudo de caso, por combinação do planejamento do experimento

POLÍTICA DE INTERVENÇÃO	REGIME DE TRABALHO	PREVISÃO DE DEMANDA		
		PESSIMISTA	OTIMISTA	MÉDIO
Atrito Adequado	Integral	ACI	ACI	VPL.TOT
			VPL.TOT	ACI
			ADP	
		BBI	BBI	BBI
Atrito Inadequado	Fora do pico	VPL.TOT	VPL.TOT	VPL.TOT
		VPL.ADM	VPL.ADM	VPL.ADM
		BBI	BBI	BBI
Atrito Inadequado	Integral	VPL.TOT	VPL.TOT	VPL.TOT
		VPL.ADM	VPL.ADM	VPL.ADM
		BBI	BBI	BBI
Atrito Adequado	Fora do pico	ACI	ACI	ACI
			VPL.TOT	
		BBI	BBI	BBI

Em seguida, procedeu-se o cálculo da eficiência composta de cada DMU, computando as eficiências e ineficiências do modelo DEA VRS orientado às saídas. Para facilitar as análises, foi registrado, em uma tabela única (Tabela 52), o número de seções contempladas em cada cenário, para cada uma das combinações do planejamento do experimento. As seções foram ainda separadas em função da sua localização relativa na pista de pouso e decolagem.

Esses resultados mostram a influência quantitativa que os três fatores analisados exercem sobre o PCI mínimo a ser adotado para determinado segmento homogêneo,

delimitados pelos três cenários. De maneira global, o modelo comportou-se de maneira sinérgica àquele previsto pelas diferentes seções do pavimento (porções centrais e laterais, próximas às cabeceiras ou longitudinalmente centrais). Foram atribuídas mais intervenções do cenário 3 (PCI mínimo = 85) nas porções mais críticas (laterais próximas às cabeceiras e centrais), ao passo que o cenário 2 (PCI mínimo = 55) foi distribuído predominantemente às porções laterais longitudinalmente centralizadas. Quanto à previsão de demanda, observa-se que o modelo foi coerente ao atribuir mais seções ao cenário 3 quanto mais pessimista foi a previsão de movimentação de passageiros. Parece fazer sentido que essa menor movimentação causa, relativamente, menor impacto aos custos indiretos, vez que o cenário 3 necessita de maiores tempos de interdição. Esse mesmo raciocínio aplica-se aos fatores “política de intervenção” e “regime de trabalho”. O cenário mais rigoroso quanto ao PCI recebe mais segmentos homogêneos nas políticas de atrito adequado e regime de trabalho fora do pico, pois demandam menores tempos de interdição de pista em relação aos seus contenedores.

Tabela 52 – Quantidade de seções do estudo de caso integrantes de cada cenário, segundo o critério da maior eficiência composta

POLÍTICA DE INTERVENÇÃO	REGIME DE TRABALHO	PORÇÃO E POSIÇÃO DOS SEGMENTOS	PREVISÃO DE DEMANDA								
			MÉDIA			OTIMISTA			PESSIMISTA		
			CENÁRIO 1	CENÁRIO 2	CENÁRIO 3	CENÁRIO 1	CENÁRIO 2	CENÁRIO 3	CENÁRIO 1	CENÁRIO 2	CENÁRIO 3
Atrito Adequado	Integral	Lateral próximo à cabeceira	1	6	1	1	6	1	1	4	3
		Lateral, longitudinalmente centralizado		9	1		9	1		7	3
		Central próximo à cabeceira	1	4	1	1	4	1	1	4	1
		Central, longitudinalmente centralizado			5			5			5
Atrito Inadequado	Fora do pico	Lateral próximo à cabeceira	1	5	2	1	5	2	1	5	2
		Lateral		9	1		9	1		9	1
		Central próximo à cabeceira	1	4	1	1	4	1	1	4	1
		Central		1	4		2	3		1	4
Atrito Inadequado	Integral	Lateral próximo à cabeceira	1	5	2	1	5	2	1	5	2
		Lateral		9	1		9	1		9	1
		Central próximo à cabeceira	1	4	1	1	4	1	1	4	1
		Central		2	3		2	3		2	3
Atrito Adequado	Fora do pico	Lateral próximo à cabeceira	1	4	3	1	6	1	1	4	3
		Lateral		7	3		9	1		7	3
		Central próximo à cabeceira	1	4	1	1	4	1	1	4	1
		Central			5			5			5

Os valores finais dos custos do ciclo de vida, dos impactos do ciclo de vida, do movimento de passageiros e do PCI dentro do período de análise foram calculados após a determinação do cenário mais eficiente para cada segmento homogêneo pelo método proposto. Esse cálculo foi realizado para cada combinação do planejamento do experimento e encontra-se na Tabela 53.

Tabela 53 – Cálculo dos custos do ciclo de vida, dos impactos do ciclo de vida e do movimento de passageiros e PCI, resultados pela atribuição do modelo proposto ao estudo de caso

COMBINAÇÃO	CUSTOS			IMPACTOS AMBIENTAIS NORMALIZADOS (WORLD 2000)							SOMATÓRIO 2017-2026	
	Direto (VPL Estrutural) R\$	Indireto (VPL Operacional) R\$	Aos usuários BBI . m ²	<i>Abiotic depletion (ADP)</i>	<i>Abiotic depletion (fossil fuels) (ADP-FF)</i>	<i>Global warming (GWP100a)</i>	<i>Ozone layer depletion (ODP)</i>	<i>Photochemical oxidation (POX)</i>	<i>Acidification (ACI)</i>	<i>Eutrophication (EUT)</i>	Passageiros	PCI . m ²
1	3.298.020,90	1.328.022,91	3.312.002,03	4,09E-09	8,71E-08	3,11E-08	1,76E-09	1,06E-08	2,69E-08	8,25E-09	86.389.260	123.375.013
2	3.755.364,45	1.075.765,95	3.281.216,73	5,24E-09	1,09E-07	3,88E-08	2,19E-09	1,35E-08	3,37E-08	1,04E-08	86.400.733	125.544.749
3	3.723.416,97	3.272.030,66	3.292.921,30	5,15E-09	1,08E-07	3,83E-08	2,17E-09	1,33E-08	3,32E-08	1,03E-08	86.142.708	124.982.849
4	3.726.208,41	439.743,17	3.160.178,68	4,61E-09	9,81E-08	3,50E-08	1,98E-09	1,19E-08	3,03E-08	9,29E-09	86.480.936	126.526.221
5	3.298.020,90	1.540.794,25	3.312.002,03	4,10E-09	8,70E-08	3,11E-08	1,76E-09	1,06E-08	2,69E-08	8,25E-09	110.366.133	123.375.013
6	3.723.416,97	1.303.912,57	3.292.921,30	5,15E-09	1,08E-07	3,83E-08	2,17E-09	1,33E-08	3,32E-08	1,03E-08	110.373.808	124.982.849
7	3.723.416,97	4.101.534,78	3.292.921,30	5,15E-09	1,08E-07	3,84E-08	2,17E-09	1,33E-08	3,32E-08	1,03E-08	110.037.289	124.982.849
8	3.298.020,90	489.609,90	3.312.002,03	4,10E-09	8,70E-08	3,11E-08	1,76E-09	1,06E-08	2,69E-08	8,25E-09	110.478.380	123.375.013
9	3.726.208,41	1.149.008,65	3.160.178,68	4,61E-09	9,81E-08	3,50E-08	1,98E-09	1,19E-08	3,03E-08	9,29E-09	62.407.886	126.526.221
10	3.755.364,45	800.561,18	3.281.216,73	5,24E-09	1,09E-07	3,88E-08	2,19E-09	1,35E-08	3,37E-08	1,04E-08	62.433.258	125.544.749
11	3.723.416,97	2.442.526,55	3.292.921,30	5,15E-09	1,08E-07	3,83E-08	2,17E-09	1,33E-08	3,32E-08	1,03E-08	62.248.126	124.982.849
12	3.726.208,41	364.981,76	3.160.178,68	4,61E-09	9,81E-08	3,50E-08	1,98E-09	1,19E-08	3,03E-08	9,29E-09	62.486.823	126.526.221

5.4 Efeitos e interações entre as variáveis do sistema

O planejamento do experimento verificado na Tabela 7, proposto para o presente estudo de caso, foi concluído após o cálculo dos custos do ciclo de vida, dos impactos do ciclo de vida, do movimento de passageiros e do PCI (Tabela 53). Esse tabelamento foi possível em função da aplicação do procedimento metodológico proposto por essa tese (Figura 14). Os três fatores (política de intervenção, regime de trabalho e previsão de demanda) foram individualmente analisados no primeiro momento. Posteriormente, as interações entre esses fatores foram mapeadas com o auxílio dos resultados desse estudo de caso. Essa fase permitirá a identificação das variáveis mais sensíveis às mudanças da aplicação, de maneira que o método não perca sua generalidade.

Dos custos do ciclo de vida, os custos indiretos, provenientes do impacto financeiro relativo à interdição temporária da pista de pouso e decolagem para a realização dos serviços de M&R, demonstraram a maior sensibilidade quando a política de intervenção foi alterada de “atrito adequado” para “atrito inadequado”. A inserção obrigatória dos serviços de manutenção corretiva de atrito pouco impactou os custos diretos da administração e o *Boeing Bump Index* (custos aos usuários). Entretanto, o maior tempo demandado para esse serviço, que inclui uma camada porosa de atrito (CPA), impactou sobremaneira o fluxo de caixa do aeroporto quando foi simulada a interdição da sua pista de pouso e decolagem. Esse impacto foi da ordem de 59%, em média. A Figura 35, construída pelas médias dos resultados observados desse fator, ilustra essa evolução dos resultados. Esse mesmo comportamento é observado pelas variáveis sob a ótica do regime de trabalho (Figura 36). A opção pelo trabalho em períodos fora do pico mostra um potencial médio de redução dos custos indiretos em 68% quando comparados ao regime integral de trabalho. Nas verificações da sensibilidade desses custos quando a previsão de demanda de passageiros é alterada, depreende-se que o cenário otimista é o mais prejudicial aos custos indiretos. De fato, não é coerente interromper a operação aeroportuária para serviços de M&R no pavimento sob altas demandas. Os cenários de demanda média e de demanda pessimista mostraram uma redução média desse custo em 18% e 36%, respectivamente, em relação ao cenário de maior demanda.

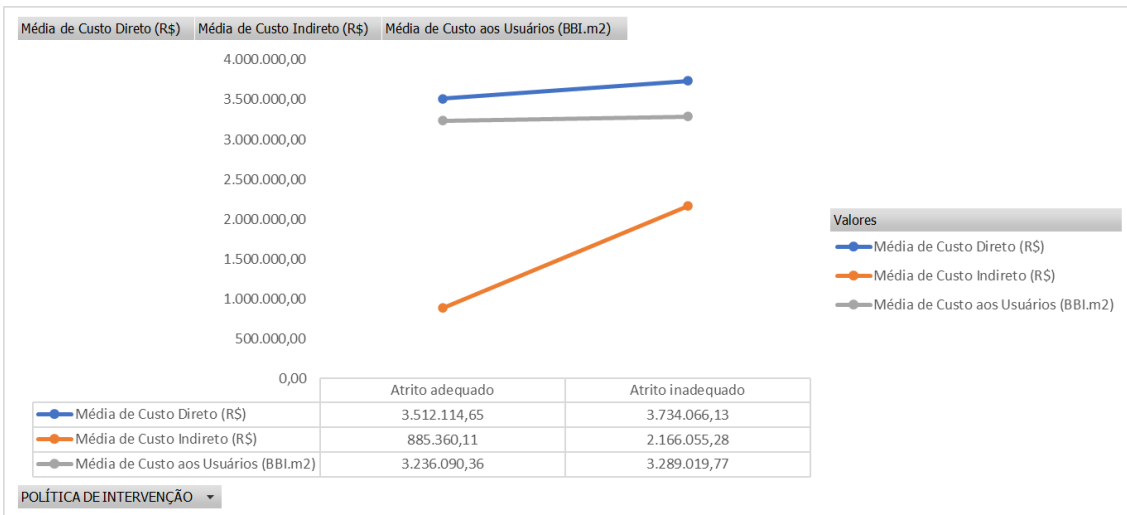


Figura 35 – Efeito observado no estudo de caso das políticas de intervenção sobre os custos do ciclo de vida

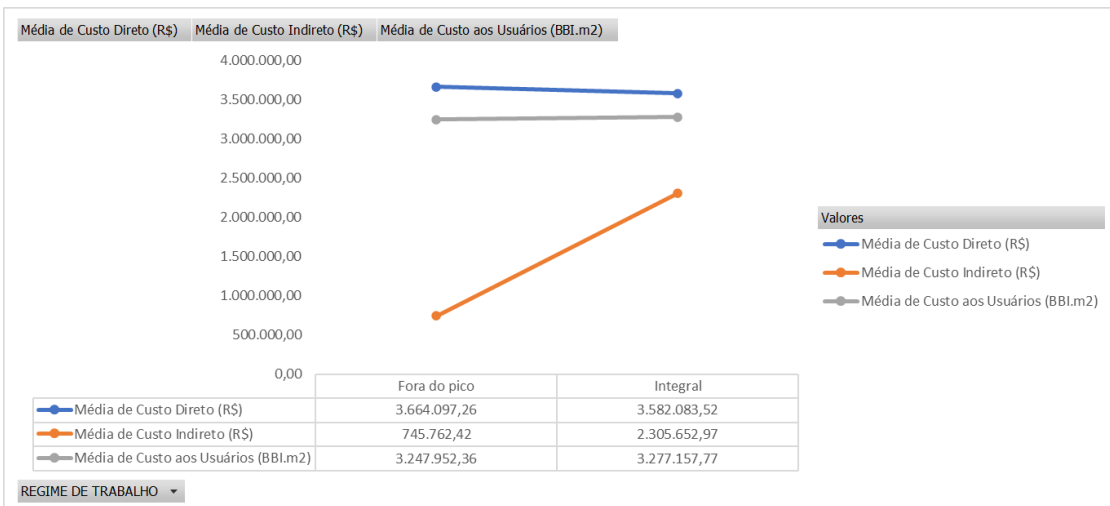


Figura 36 – Efeito observado no estudo de caso do regime de trabalho sobre os custos do ciclo de vida

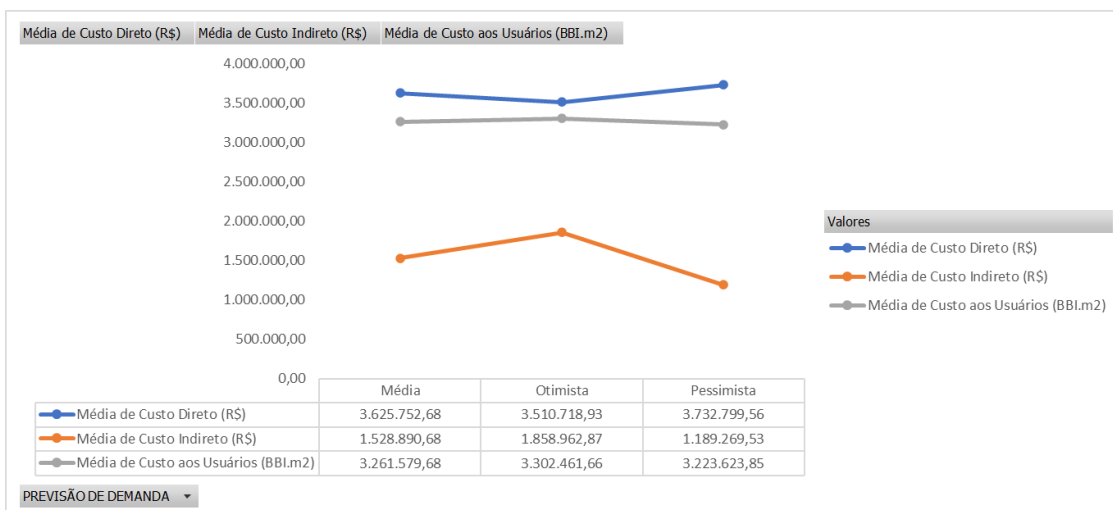


Figura 37 – Efeito observado no estudo de caso do cenário de previsão de demanda sobre os custos do ciclo de vida

Nas variáveis ambientais, destacaram-se o comportamento da sensibilidade de *global warming* e *acidification*. Elas mostraram, na Figura 38, uma média relativamente mais pronunciada nas combinações cuja política de intervenção era atrito inadequado, em relação ao cenário de atrito adequado. Esse acréscimo, porém, se mostrou em uma ordem de grandeza de 14%. Como era de se esperar, essas variáveis não sofreram alterações significativas nas alterações de regime de trabalho (Figura 39) e de previsão de demanda (Figura 40), já que englobam apenas as fases de extração, produção e transporte dos insumos e das horas trabalhadas dos equipamentos de engenharia.

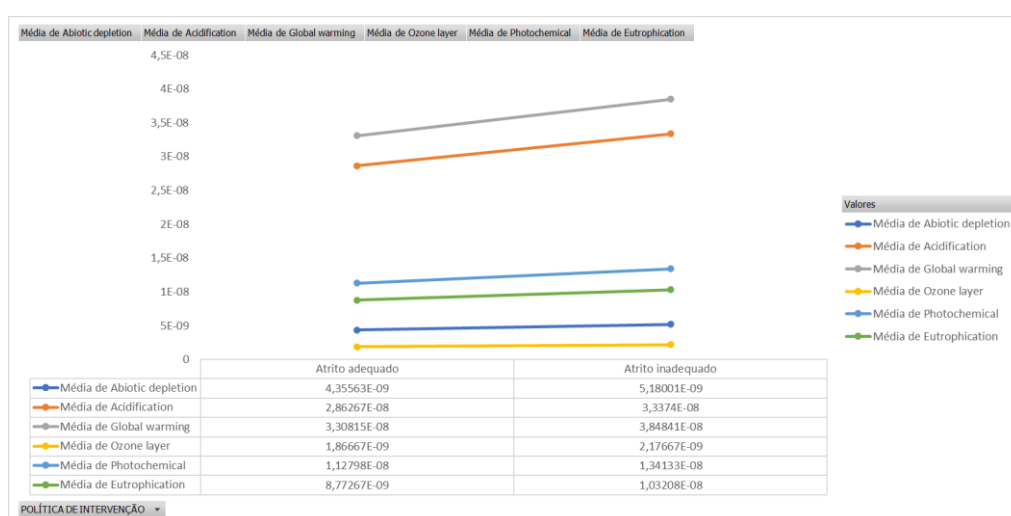


Figura 38 – Efeito observado no estudo de caso das políticas de intervenção sobre os impactos do ciclo de vida



Figura 39 – Efeito observado no estudo de caso do regime de trabalho sobre os impactos do ciclo de vida

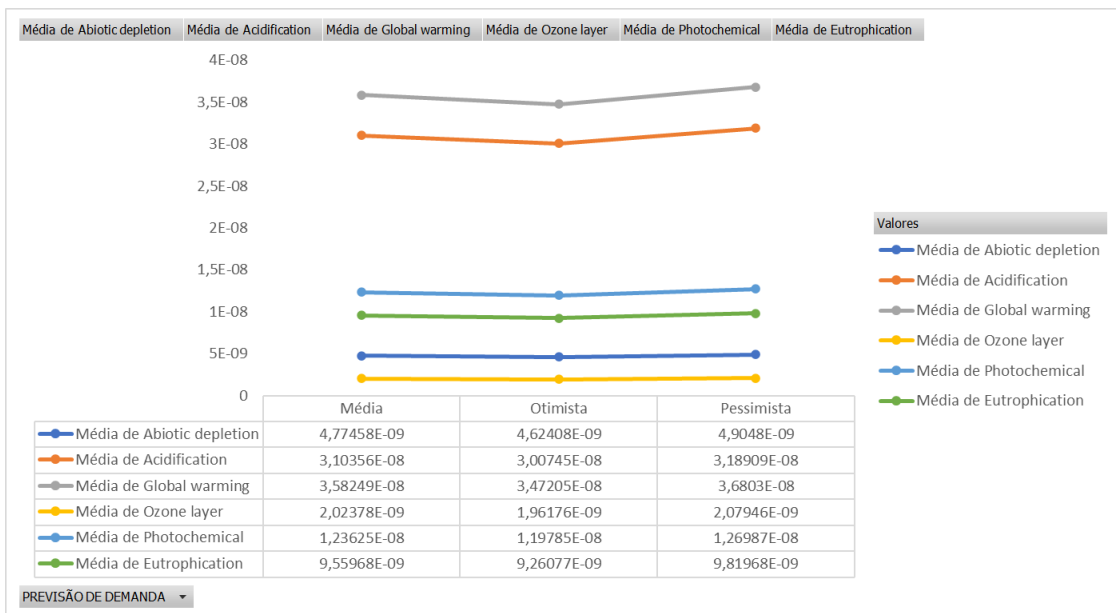


Figura 40 – Efeito observado no estudo de caso da previsão de demanda sobre os impactos do ciclo de vida

Apesar de terem sido identificadas relevantes sensibilidades de algumas variáveis nas alterações de fatores isolados, não é correto afirmar que a mudança de um fator irá contribuir integralmente para a modificação da variável. Em alguns casos, pode ocorrer interação entre os fatores. No caso dos custos indiretos, que mostraram uma sensibilidade

maior aos fatores isolados, observa-se, na Figura 41, que o regime de trabalho integral provoca uma instabilidade sensivelmente maior do que o regime de trabalho fora do pico quando a política de intervenção é alterada. Essa estabilidade maior à variável provocada pelo regime de trabalho fora do pico também é observada na interação com a previsão de demanda (Figura 42).



Figura 41 – Interação observada no estudo de caso entre política de intervenção e regime de trabalho sobre os custos indiretos

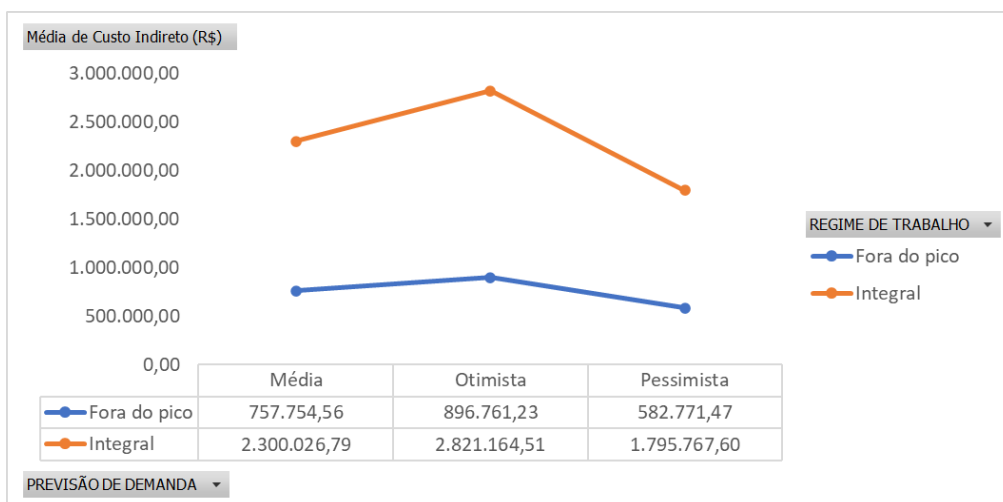


Figura 42 – Interação observada no estudo de caso entre previsão de demanda e regime de trabalho sobre os custos indiretos

Essa interação também é observada nas variáveis ambientais. Na Figura 43, por exemplo, o impacto ambiental *acidification* mostra alteração significativa de valor na mudança do regime de trabalho apenas sob a condição de previsão de demanda média. Nas demais condições de previsão de demanda, a eventual alteração do regime de trabalho mostra-se irrelevante.



Figura 43 – Interação observada no estudo de caso entre política de intervenção e regime de trabalho sobre os custos indiretos

5.5 Análise comparativa entre sistemas de suporte à decisão

Para esclarecer, com maior ênfase, as características intrínsecas do procedimento metodológico proposto por essa tese, o presente item demonstra, por meio comparativo, os resultados obtidos no estudo de caso e uma análise de custo-benefício. Optou-se por comparar a combinação 5 (Tabela 7) entre esses sistemas de suporte à decisão, já que ela utiliza mais variáveis de entrada em seu sistema DEA VRS.

A combinação 5 utiliza, como variável de entrada, todos os custos do ciclo de vida (custos diretos da administração, custos indiretos da interdição da pista de pouso e os custos aos usuários representados pelo acréscimo de BBI) e duas variáveis dos impactos do ciclo de vida (*abiotic depletion* e *acidification*). A Tabela 54 mostra os resultados obtidos dentro dos cenários 1, 2 e 3, além daqueles oriundos pelo método proposto pela tese. Como primeira abordagem, cabe lembrar que o SGPA proposto adota um sistema

DEA VRS orientado às saídas, ou seja, ele busca maximizar as saídas para um mesmo nível de insumos. Portanto, o método proposto será eficaz uma vez que ele conseguir melhorar a condição do pavimento aeroportuário e evitar a perda de movimento de passageiros, para os mesmos níveis de custos do ciclo de vida e impactos do ciclo de vida. Nesse contexto, além de apresentar os resultados, foram calculadas as diferenças entre as necessidades de entradas e de saídas para que o pavimento pudesse alcançar o maior nível de condição de pavimento, dentro das propostas de cada sistema de suporte à decisão. Para as análises, essas diferenças foram elencadas sob o título de “DELTA”, mostrando o quanto o tomador de decisão teria que dispor a mais, em cada cenário, para alcançar o nível mais rigoroso de PCI (cenário 3 e SGPA proposto).

O SGPA proposto consegue incorporar diversas variáveis, independentemente de suas dimensionalidades. Entretanto, como a análise de custo-benefício possui essa limitação, as análises foram realizadas sobre o custo e sobre os impactos ambientais, uma por vez. Hipoteticamente, para que o Plano de M&R da combinação 5 migrasse do cenário 2 (PCI mínimo = 55) para o cenário 3 (PCI mínimo = 85), o tomador de decisão teria que desembolsar mais R\$ 0,0909 ou R\$ 0,0906 por PCI para migrar, respectivamente, do cenário 2 para o 3 ou do cenário 1 para o 3. Essa migração também resulta em menor movimentação de passageiros (déficit de aproximadamente 124 mil e 43 mil) e no aumento normalizado dos impactos ambientais por PCI (aproximadamente $9E-16$ e $1E-15$). Avaliando esses mesmos índices quando se migra do cenário 2 para o SGPA proposto, verifica-se que o custo por PCI adicional é menor que os demais (R\$ 0,0781 por PCI), bem como a quantidade de impactos ambientais normalizados por PCI adicional (aproximadamente $6E-16$). O déficit em movimentação de passageiros para essa última migração é de aproximadamente 59 mil passageiros. Já na migração do cenário 1 para o SGPA proposto, apesar de ocorrer um ligeiro aumento nos impactos ambientais, o pavimento estaria funcional para mais 21 mil passageiros pela metade do valor dos custos diretos e indiretos.

Dessa maneira, o método proposto por essa tese mostrou-se capaz de aumentar os índices de condição de pavimento sem aumentar demasiadamente os níveis de entrada dos insumos financeiros e ambientais, mantendo o déficit de movimentação de passageiros em níveis compatíveis com seus pares.

Tabela 54 – Comparativo entre análise de custo-benefício e o SGPA proposto, aplicados na combinação 5 do planejamento do experimento

CUSTOS E BENEFÍCIOS	ANÁLISE DE CUSTO-BENEFÍCIO					SGPA PROPOSTO		
	CENÁRIO 1	CENÁRIO 3	CENÁRIO 2	DELTA C2 -> C3	DELTA C1 -> C3	MÉTODO SGPA	DELTA C2 -> SGPA	DELTA C1 -> SGPA
Custos Diretos (R\$)	2.670.789,02	4.925.063,59	2.600.933,94	2.324.129,65	2.254.274,57	3.298.020,90	697.086,96	627.231,88
Custos Indiretos (R\$)	1.685.231,58	2.026.808,63	1.097.785,21	929.023,42	341.577,05	1.540.794,25	443.009,04	-144.437,33
Custos aos Usuários (BBI . m2)	3.668.115,50	2.808.448,67	3.598.595,81	-790.147,15	-859.666,84	3.312.002,03	-286.593,78	-356.113,47
<i>Abiotic Depletion</i>	3,55E-09	6,55E-09	2,96E-09	3,58E-09	3,00E-09	4,10E-09	1,13E-09	5,51E-10
<i>Acidification</i>	2,25E-08	4,15E-08	2,10E-08	2,05E-08	1,90E-08	2,69E-08	5,92E-09	4,44E-09
Somatório de (PCI . m ²)	120.365.732,26	139.539.122,53	112.441.713,19	27.097.409,34	19.173.390,27	123.375.013	10.933.299,79	3.009.280,71
Somatório de PAX	110.344.975,39	110.301.552,34	110.425.603,44	-124.051,10	-43.423,05	110.366.133	-59.470,77	21.157,27
R\$/PCI				0,0909	0,0906		0,0781	0,0421
AICV/PCI				8,89E-16	1,15E-15		6,46E-16	1,66E-15

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS, LIMITAÇÕES E PROPOSIÇÕES PARA NOVOS ESTUDOS

6.1 Considerações finais e limitações

O modelo de sistema de gerenciamento de pavimentos aeroportuários proposto por essa tese conseguiu incluir satisfatoriamente impactos ambientais calculados por uma análise de ciclo de vida em situações de manutenção e reabilitação de pavimentos aeroportuários, em fase de tomada de decisão, sem detrair os critérios financeiros. O modelo *Data Envelopment Analysis* (DEA) parece se adequar a esse cenário e possui ferramentas adicionais suficientes para prevenir óbices comuns das atividades de gerenciamento de pavimentos. No entanto, o problema de se compor uma forma de cálculo para os custos indiretos em análise de custo do ciclo de vida aplicados a SGPA ainda está em aberto. A solução proposta por essa tese resolve essa problemática com limitações. A formulação só é válida para aeroportos que possuem capacidade limitada ou que estão próximos aos seus limites operacionais, pois ela adota, como custo indireto, o déficit em movimento de passageiros ocasionado por uma eventual interdição temporária da pista de pouso e decolagem.

O tema abordado tem se mostrado relevante e com tendência de alta nas pesquisas bibliométricas realizadas. A dificuldade encontrada em termos de bibliometria refere-se apenas à particularização do pavimento no cenário aeroportuário. Para o meio rodoviário, as fontes são vastas, o que não é observado para o caso em tela.

Os sistemas de gerenciamento de pavimentos aeroportuários já estão, em sua maioria, integrados a algum modelo baseado em ciclo de vida. A revisão da literatura mostrou que a grande maioria desses modelos possuem uma preocupação mais associada aos custos diretos das obras. Os custos indiretos, por sua vez, são estimados ou coletados de dados históricos.

A análise do ciclo de vida, por sua vez, mostra-se, cada vez mais, como uma ferramenta viável para ser incorporada em análises de projetos. O conceito é sistemático e simples, consistindo em: definir o objetivo e o escopo, realizar o inventário, calcular os impactos e interpretar os resultados. Apesar de se apresentar com essa relativa simplicidade, a revisão da literatura mostrou que, pelo menos no cenário da pavimentação, não há um firme consenso sobre as escolhas do escopo das análises, nem

mesmo sobre os próprios impactos ambientais. O óbice maior à ampla aplicação são os inventários de ciclo de vida, que são construídos a partir de fontes primárias específicas e localizadas, com maior ênfase na Europa e na América do Norte.

O método para um gerenciamento de pavimentos aeroportuários proposto por essa tese inclui cinco grandes etapas: projeções estruturais, projeções operacionais, análise do custo do ciclo de vida, análise do ciclo de vida e sistema de suporte à decisão. Uma contribuição metodológica ao tema encontra-se na proposição do cálculo dos custos relacionados à necessidade de interdição da pista de pouso e decolagem, a depender do Plano de manutenção e reabilitação escolhido, denominado “custos indiretos”. Outra contribuição foi a sugestão de se modelar o problema pelo método DEA, que consegue desobstruir, com programação linear, os problemas de dimensionalidade entre as variáveis financeiras e de impactos ambientais.

Os resultados oriundos do estudo de caso, centrado nos dados do Aeroporto Internacional de Brasília, mostraram que as medidas de eficiência composta (eficiência e ineficiência) utilizadas no modelo não só ranquearam as melhores opções para cada segmento homogêneo da pista de pouso e decolagem, como também as aglutinou por importâncias relativas. Seções mais críticas e centrais da pista de pouso são mais eficientes se estiverem sempre em ótimas condições, mesmo quando se insere uma componente ambiental como entrada do sistema DEA. Os segmentos homogêneos secundários, como as laterais das pistas de pouso, foram relegados às soluções de manutenção e reabilitação com menor rigor de condição mínima de pavimento (PCI mínimo).

Sabendo-se que o modelo de procedimento metodológico proposto não deve perder a sua generalidade, foram observados os comportamentos das variáveis de entrada quando da alteração das condições da política de intervenção (atrito adequado e atrito inadequado), do regime de trabalho na pista (tempo integral ou nos intervalos fora de pico, notificados por NOTAM – *Notice to Airmen*) e da previsão de demanda no período de análise (média, otimista e pessimista). O experimento fatorial mostrou que as variáveis, particularmente os custos indiretos, atenuam suas variabilidades quando estão sob as condições de regime de trabalho em períodos fora do pico.

Por fim, ficou demonstrada característica peculiar do sistema proposto quando ele foi comparado com a análise de custo-benefício. Não é possível traçar um paralelo direto

entre esses dois sistemas de suporte à decisão, pois eles possuem objetivos diferentes. O método DEA em retorno de escala variável orientado às saídas, incorporado ao sistema de gerenciamento de pavimentos aeroportuários proposto, visa aumentar a capacidade de movimentação de passageiros e a condição do pavimento (PCI) sob o mesmo nível de insumos financeiros e de impactos ambientais. Nesse contexto, o método proposto consegue aumentar o rigor de condição mínima de pavimento, cobrando um preço financeiro e ambiental menor por PCI que os cenários da análise de custo-benefício e mantendo um déficit de movimentação de passageiros na mesma escala entre os comparáveis. Em resumo, por atribuir importâncias relativas a cada segmento homogêneo e não os tratar isonomicamente em cenários de PCI mínimo, o método de sistema de gerenciamento de pavimentos aeroportuários proposto por essa tese não entrega, necessariamente, um Plano de M&R com menores custos financeiros e ambientais. Ele seleciona as opções mais eficientes para a maximização da condição do pavimento com a menor intercorrência em movimento de passageiros, honrando a finalidade precípua de uma infraestrutura de transportes.

6.2 Proposições para novos estudos

Na abordagem relatada, ficou claro que o método de sistema de gerenciamento de pavimentos aeroportuários (SGPA) proposto por essa tese abriu uma série de oportunidades de melhoria e novos estudos em função de seu caráter multidisciplinar. Essas proposições de novos estudos visam suplantam as limitações descritas e ampliar o escopo do sistema.

Inicialmente, cabe mencionar que o núcleo central de funcionamento do SGPA é o seu modelo de deterioração do pavimento, apesar de ele não consistir no foco dessa pesquisa. Seria muito conveniente o aprofundamento desse estudo, propondo a construção de um modelo nacional, com monitoramento funcional e mecânico do pavimento nas condições de tráfego, clima e estruturas dos aeroportos brasileiros.

O SGPA dessa tese incorporou o *Boeing Bump Index* (BBI) como índice para representar os custos aos usuários. Apesar da literatura apresentar resultados melhores do BBI em relação ao índice de irregularidade longitudinal (IRI) para a representação dos danos nos trens de pouso, pneus e aviônicos, um estudo nacional com essa comparação

entre índices traria grandes avanços para o sistema. O IRI estaria, em tese, mais correlacionado ao desgaste dos pneus e a necessidade de desemborrachamento das pistas.

Outro aprimoramento seria adicionado aos custos diretos por uma pesquisa que utilizasse os valores de mercado para compor esses valores nos períodos fora do pico. Nessa tese, assumiu-se que os custos do sistema SICRO representariam ambas as condições de regime de trabalho (integral e fora do pico) para os serviços de manutenção e reabilitação, mas os custos horários de mão de obra e de mobilização podem ser diferentes para cada uma dessas situações.

REFERÊNCIAS

- AAPTP (AIRFIELD ASPHALT PAVEMENT TECHNOLOGY PROGRAM). **Life cycle cost analysis for airport pavements - Final Report 06-06**. . Auburn, AL, USA, [s.n.], 2011.
- ABREU, U. G. P. de, GOMES, E. G., SANTOS, H. do N. "Análise Envoltória de Dados e métodos de seleção de variáveis para avaliação sistêmica da introdução de tecnologias na pecuária de gado de corte do Pantanal". 2005. **Anais [...]** Gramado, Brasil, SBPO, 2005.
- ACOSTA, C. M. M., DA SILVA, A. M. V. de A., LIMA, M. L. P. de. "Aplicação de Análise Envoltória de Dados (DEA) para medir a eficiência em portos brasileiros", **Revista de Literatura de Transportes**, v. 5, n. 4, p. 88–102, 2011. .
- ALQAHTANI, A., WHYTE, A. "Artificial Neural Networks incorporating cost significant Items towards enhancing estimation for (life-cycle) costing of construction projects", **Australasian Journal of Construction Economics and Building**, 2013. DOI: 10.5130/ajceb.v13i3.3363. .
- ANAC (AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL). **Dados Estatísticos**. 2019. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/assuntos/dados-e-estatisticas/dados-estatisticos/dados-estatisticos>. Acesso em: 11 jun. 2019.
- ANAC (AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL). **Manual de obras e serviços de manutenção**. . Brasília, Brazil, [s.n.], 2020a. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/publicacoes/publicacoes-arquivos/manual-de-obras-e-servicos-de-manutencao.pdf>.
- ANAC (AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL). **Manual de sistema de gerenciamento de pavimentos aeroportuários**. . Brasília, Brasil, [s.n.], 2017.
- ANAC (AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL). **Regulamento brasileiro da aviação civil (RBAC 153 - EMD 5)**. . Brasília, Brasil, [s.n.], 2020b.
- ANAC (AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL). **Resolução nº 236**. . Brasília, Brasil, [s.n.], 2012.
- ANAC (AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL). **São Gonçalo do Amarante/Natal (RN)**. 2020c. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/concessoes/aeroportos-concedidos/natal>. Acesso em: 2 nov. 2020.
- ANASTASIOU, E. K., LIAPIS, A., PAPAYIANNI, I. "Comparative life cycle assessment of concrete road pavements using industrial by-products as alternative materials", **Resources, Conservation and Recycling**, v. 101, p. 1–8, 2015. DOI: 10.1016/j.resconrec.2015.05.009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.05.009>.
- ANDERSON, D. I., PETERSON, D., SHEPPARD, L. W., *et al.*, "Pavement Design Rehabilitation Strategies". **Project FHWA/UT-79-6, Utah DOT**, Springfield, EUA, Government Publications Clearinghouse, 1979. .
- ANNEMA, J. A., FRENKEN, K., KOOPMANS, C., *et al.* "Relating cost-benefit analysis results with transport project decisions in the Netherlands", **Letters in Spatial and Resource Sciences**, 2017. DOI: 10.1007/s12076-016-0175-5. .

- ANSARILARI, Z., GOLROO, A. "Integrated airport pavement management using a hybrid approach of Markov Chain and supervised multi-objective genetic algorithms", **International Journal of Pavement Engineering**, v. 21, n. 14, p. 1864–1873, 2020. DOI: 10.1080/10298436.2019.1571208. .
- ANTHONISSEN, J., VAN DEN BERGH, W., BRAET, J. **Review and environmental impact assessment of green technologies for base courses in bituminous pavements. Environmental Impact Assessment Review**. [S.l.: s.n.]. , 2016
- APA (ASPHALT PAVEMENT ALLIANCE). **Life-cycle cost analysis: a position paper**. . Lanham, EUA, [s.n.], 2011.
- ARAÚJO, J. P. C., OLIVEIRA, J. R. M., SILVA, H. M. R. D. "The importance of the use phase on the LCA of environmentally friendly solutions for asphalt road pavements", **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 32, p. 97–110, 2014. DOI: 10.1016/j.trd.2014.07.006. .
- ASTM (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS). **Standard Practice for Computing International Roughness Index of Roads From Longitudinal Profile Measurements (ASTM E1926-08)**. . West Conshohocken, EUA, [s.n.], 2008.
- ASTM (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS). **Standard Test Method for Airport Pavement Condition Index Surveys (ASTM D5340-12)**. . West Conshohocken, [s.n.], 2018.
- AZARIJAFARI, H., YAHIA, A., AMOR, M. Ben. "Life cycle assessment of pavements: Reviewing research challenges and opportunities", **Journal of Cleaner Production**, 2015. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.09.080. .
- BABASHAMSI, P., MD YUSOFF, N. I., CEYLAN, H., *et al.* "Evaluation of pavement life cycle cost analysis: Review and analysis", **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 9, n. 4, p. 241–254, 2016. DOI: 10.1016/j.ijprt.2016.08.004. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.08.004>.
- BARBARELLA, M., D'AMICO, F., DE BLASIIS, M. R., *et al.* "Use of terrestrial laser scanner for rigid airport pavement management", **Sensors (Switzerland)**, 2018. DOI: 10.3390/s18010044. .
- BATISTA, N. A. (Instituto M. de E. **Uma proposta para sistema de gerência de pavimentos aplicada a aeroportos militares**. 2015. Instituto Militar de Engenharia, 2015.
- BEJARANO, M. O., KAHLE, S., MCGREW, W., *et al.* "Case history: Concrete pavement reconstruction of the intersection of runway 18L-36R and 8-26 at Tulsa Int'l Airport". 2015. **Anais [...]** Miami, USA, American Society of Civil Engineers, 2015. DOI: 10.1061/9780784479216.032.
- BERGER, M., FINKBEINER, M. "Correlation analysis of life cycle impact assessment indicators measuring resource use", **International Journal of Life Cycle Assessment**, 2011. DOI: 10.1007/s11367-010-0237-7. .
- BERGMEIR, C., BENÍTEZ, J. M. "On the use of cross-validation for time series predictor evaluation", **Information Sciences**, v. 191, p. 192–213, 2012. DOI: 10.1016/j.ins.2011.12.028. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ins.2011.12.028>.

- BERTOLOTO, R. F., MELLO, J. C. C. B. S. de. "Eficiência de portos e terminais privados brasileiros com características distintas", **Journal of Transport Literature**, v. 5, n. 2, p. 421, 2011. .
- BERTOMÉU-SÁNCHEZ, S., ESTACHE, A. "Unbundling political and economic rationality: A non-parametric approach tested on transport infrastructure in Spain", **Transport Policy**, v. 59, n. July, p. 181–195, 2017. DOI: 10.1016/j.tranpol.2017.07.012. .
- BISWAS, W. K. "Carbon footprint and embodied energy assessment of a civil works program in a residential estate of Western Australia", **International Journal of Life Cycle Assessment**, 2014. DOI: 10.1007/s11367-013-0681-2. .
- BRUNDTLAND, G. H. **Our Common Future: Report of the 1987 World Commission on Environment and Development**. . Oxford, [s.n.], 1987.
- BUTT, Abbas A., SHAHIN, M. Y., CARPENTER, S. H., *et al.* "Application of Markov Process to Pavement Management Systems at Network Level", **3rd International Conference on Managing Pavements**, 1994. .
- BUTT, Ali Azhar, BIRGISSON, B. "Assessment of the attributes based life cycle assessment framework for road projects", **Structure and Infrastructure Engineering**, 2016. DOI: 10.1080/15732479.2015.1086388. .
- CABEZA, L. F., RINCÓN, L., VILARIÑO, V., *et al.* **Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews**. [S.l.: s.n.]. , 2014
- CELAURO, C., CORRIERE, F., GUERRIERI, M., *et al.* "Environmental analysis of different construction techniques and maintenance activities for a typical local road", **Journal of Cleaner Production**, 2017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.10.119. .
- CELAURO, C., CORRIERE, F., GUERRIERI, M., *et al.* "Environmentally appraising different pavement and construction scenarios: A comparative analysis for a typical local road", **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, 2015. DOI: 10.1016/j.trd.2014.10.001. .
- CHARNES, A., COOPER, W. W., RHODES, E. "Measuring the efficiency of decision making units", **European Journal of Operational Research**, 1978. DOI: 10.1016/0377-2217(78)90138-8. .
- CHEN, F., ZHU, H., YU, B., *et al.* "Environmental burdens of regular and long-term pavement designs: A life cycle view", **International Journal of Pavement Engineering**, v. 17, n. 4, p. 300–313, 2016. DOI: 10.1080/10298436.2014.993189. .
- CHEN, S.-H., NI, F. M.-W. "Explore pavement roughness under various funding for the Taiwan provincial highways using LCCA", **International Journal of Pavement Engineering**, v. 20, n. 12, p. 1392–1399, 2019. DOI: 10.1080/10298436.2018.1429610. .
- CHEN, X., WANG, H. "Life cycle assessment of asphalt pavement recycling for greenhouse gas emission with temporal aspect", **Journal of Cleaner Production**, 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.207. .
- CHERUBINI, E., ZANGHELINI, G. M., PIEMONTE, D., *et al.* "Environmental sustainability for highways operation: Comparative analysis of plastic and steel screen anti-glare systems", **Journal of Cleaner Production**, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118152. .

- CHESTER, M. V., HORVATH, A. "Environmental assessment of passenger transportation should include infrastructure and supply chains", **Environmental Research Letters**, 2009. DOI: 10.1088/1748-9326/4/2/024008. .
- CHOI, K., KIM, Y. H., BAE, J., *et al.* "Determining Future Maintenance Costs of Low-Volume Highway Rehabilitation Projects for Incorporation into Life-Cycle Cost Analysis", **Journal of Computing in Civil Engineering**, 2016. DOI: 10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000533. .
- CHOI, K., LEE, H. W., MAO, Z., *et al.* "Environmental, Economic, and Social Implications of Highway Concrete Rehabilitation Alternatives", **Journal of Construction Engineering and Management**, 2016. DOI: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0001063. .
- CHOU, C.-P., LEE, N. **A sensitivity study of RAP cost and performance on its life cycle benefits. Advanced Materials Research.** Dept. of Civil Engineering, 1, Roosevelt Rd, Sec. 4, Taipei, Taiwan, [s.n.] , 2013
- CNT (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE). **Pesquisa CNT de rodovias 2019.** . Brasília, Brasil, [s.n.], 2019. Disponível em: <https://pesquisarodovias.cnt.org.br/downloads/ultimaversao/gerencial.pdf>.
- DI MASCIO, P., MORETTI, L. "Implementation of a pavement management system for maintenance and rehabilitation of airport surfaces", **Case Studies in Construction Materials**, v. 11, p. e00251, 2019. DOI: 10.1016/j.cscm.2019.e00251. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00251>.
- DNIT (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES). **Manual de restauração de pavimentos asfálticos (Publicação IPR - 720).** . Rio de Janeiro, Brasil, [s.n.], 2006.
- DONG, Y., MIRAGLIA, S., MANZO, S., *et al.* "Environmental sustainable decision making – The need and obstacles for integration of LCA into decision analysis", **Environmental Science and Policy**, v. 87, n. May, p. 33–44, 2018. DOI: 10.1016/j.envsci.2018.05.018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.05.018>.
- DOYLE, J., GREEN, R. "Efficiency and cross-efficiency in DEA derivations, meanings and uses", **Journal of the Operational Research Society**, 1994. DOI: 10.1057/jors.1994.84. .
- ENGELBRECHT, H. J. "Natural capital, subjective well-being, and the new welfare economics of sustainability: Some evidence from cross-country regressions", **Ecological Economics**, 2009. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2009.08.011. .
- ESTELLITA LINS, M. P., MOREIRA, M. C. B., "Implementação com seleção de variáveis em modelos DEA". In: ESTELLITA LINS, M. P., ANGULO MEZA, L. (Org.), **Análise envoltória de dados e perspectivas de integração no ambiente do apoio à decisão**, [S.l: s.n.], 2000. .
- FAA (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION). **Advisory Circular 150/5370-13A: Off-peak construction of airport pavements using hot-mix asphalt.** . Washington, USA, [s.n.], 2006.
- FAA (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION). **Airport pavement management program (PMP) (AC 150/5380-7B).** . Washington, EUA, [s.n.], 2014a.
- FAA (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION). **Guidelines and Procedures for**

- Measuring Airfield Pavement Roughness (AC 150/5380-9)**. . Washington, EUA, [s.n.], 2009.
- FAA (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION). **Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength - PCN (AC 150/5335-5C)**. . Washington, EUA, [s.n.], 2014b.
- FAVA, J. A., SMEREK, A., HEINRICH, A. B., *et al.*, "The role of the society of environmental toxicology and chemistry (SETAC) in life cycle assessment (LCA) development and application". **Background and Future Prospects in Life Cycle Assessment**, Dordrecht, Springer Netherlands, 2014. .
- FERNANDES, E., PACHECO, R. R. **Transporte aéreo no Brasil: uma visão de mercado**. 1. ed. Rio de Janeiro, Brazil, Elsevier, 2016.
- FHWA (FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION). **Life-Cycle Cost Analysis Primer**. . Washington, EUA, [s.n.], 2002.
- FHWA (FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION). **Life Cycle Cost Analysis: Summary of Proceedings**. Washington, EUA, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 1995.
- FIGUEIRA, J., GRECO, S., EHROGOTT, M. **Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys**. Nova Iorque, EUA, Springer, 2005.
- FINNVEDEN, G., HAUSCHILD, M. Z., EKVALL, T., *et al.* **Recent developments in Life Cycle Assessment. Journal of Environmental Management**. [S.l: s.n.]. , 2009
- FRIEDMAN, L., SINUANY-STERN, Z. "Combining ranking scales and selecting variables in the DEA context: The case of industrial branches", **Computers and Operations Research**, 1998. DOI: 10.1016/S0305-0548(97)00102-0. .
- FUSELIER, G. K., ORANDELLO, B. J., ARZE, J. M. "Customizing Work Planning with MicroPaver and Paver-GIS Washington Dulles International Airport Case Study". 2001. **Anais [...]** Chicago, USA, American Society of Civil Engineers, 2001. DOI: 10.1061/40579(271)15.
- GENDREAU, M., SORIANO, P. "Airport pavement management systems: An appraisal of existing methodologies", **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, 1998. DOI: 10.1016/S0965-8564(97)00008-6. .
- GIANI, M. I., DOTELLI, G., BRANDINI, N., *et al.* "Comparative life cycle assessment of asphalt pavements using reclaimed asphalt, warm mix technology and cold in-place recycling", **Resources, Conservation and Recycling**, v. 104, p. 224–238, nov. 2015. DOI: 10.1016/j.resconrec.2015.08.006. .
- GRANSBERG, D. D. "Life-cycle cost analysis of surface retexturing with shotblasting as an asphalt pavement preservation tool", **Transportation Research Record**, n. 2108, p. 46–52, 2009. DOI: 10.3141/2108-05. .
- GREEN, R. J., LEPKOWSKI, W. **A forgotten model for purposeful science. Issues in Science and Technology**. [S.l: s.n.]. , 2006
- GUEDES, L. E. M., PENA, R. C. M., GUERREIRO, A. dos S. "Análise de Eficiência dos Terminais Portuários do Mercosul", **XXII ANPET**, p. 319–330, 2008. .
- GUINÉE, J. B., GORRÉE, M., HEIJUNGS, R., *et al.* **Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. Part III: Scientific background**. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2002.

- GULOTTA, T. M., MISTRETTA, M., PRATICÒ, F. G. "A life cycle scenario analysis of different pavement technologies for urban roads", **Science of the Total Environment**, v. 673, p. 585–593, 2019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.046. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.046>.
- GUPTA, V., SHARMA, K., SANGWAN, M. S. "AIRLINES PASSENGER FORECASTING USING LSTM BASED RECURRENT NEURAL NETWORKS", **International Journal “Information Theories and Applications”**, v. 26, n. 2, p. 178–187, 2019. .
- HARVEY, J., KENDALL, A., SANTERO, N., *et al.* "Use of Life Cycle Assessment for asphalt pavement at the network and project levels". 2014. **Anais [...]** [S.l: s.n.], 2014.
- HASAN, U., WHYTE, A., AL JASSMI, H. "Critical review and methodological issues in integrated life-cycle analysis on road networks", **Journal of Cleaner Production**, v. 206, p. 541–558, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.09.148. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.148>.
- HAUSCHILD, M. Z. **Assessing environmental impacts in a life-cycle perspective. Environmental Science and Technology**. [S.l: s.n.] , 2005
- HAUSCHILD, M. Z., GOEDKOOP, M., GUINÉE, J., *et al.* "Identifying best existing practice for characterization modeling in life cycle impact assessment", **International Journal of Life Cycle Assessment**, 2013. DOI: 10.1007/s11367-012-0489-5. .
- HAWAS, Y. E., MD. BAYZID KHAN, BASU, N. "Evaluating and enhancing the operational performance of public bus systems using GIS-based data envelopment analysis", **Journal of Public Transportation**, v. 15, n. 2, p. 19–44, 2012. DOI: 10.5038/2375-0901.15.2.2. .
- HEUVINCK, T. **Life Cycle Cost Analysis : Application to an airport pavement**. 2015. Técnico Lisboa, 2015.
- HONG, F., PROZZI, J. A. "Evaluation of recycled asphalt pavement using economic, environmental, and energy metrics based on long-term pavement performance sections", **Road Materials and Pavement Design**, v. 19, n. 8, p. 1816–1831, 2018. DOI: 10.1080/14680629.2017.1348306. .
- HOOD, C., LAING, R., GRAY, D., *et al.* "The application of major road infrastructure to support and drive sustainable urban mobility". 2018. **Anais [...]** Victoria, Canadá, NHICE, 2018.
- HOOGMARTENS, R., VAN PASSEL, S., VAN ACKER, K., *et al.* **Bridging the gap between LCA, LCC and CBA as sustainability assessment tools. Environmental Impact Assessment Review**. [S.l: s.n.] , 2014
- HUANG, T. Y., CHIUH, P. T., LO, S. L. "Life-cycle environmental and cost impacts of reusing fly ash", **Resources, Conservation and Recycling**, 2017. DOI: 10.1016/j.resconrec.2016.07.001. .
- HUANG, Y., BIRD, R., HEIDRICH, O. "Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements", **Journal of Cleaner Production**, v. 17, n. 2, p. 283–296, jan. 2009. DOI: 10.1016/j.jclepro.2008.06.005. .
- HUDSON, S. W., HUDSON, W. R., CARMICHAEL, R. F. "Minimum requirements for standard pavement management systems". 1992. **Anais [...]** [S.l: s.n.], 1992. DOI:

10.1520/stp17792s.

- HUIJBREGTS, M. A. J., HELLWEG, S., FRISCHKNECHT, R., *et al.* "Cumulative energy demand as predictor for the environmental burden of commodity production", **Environmental Science and Technology**, 2010. DOI: 10.1021/es902870s. .
- HUIJBREGTS, M. A. J., ROMBOUITS, L. J. A., HELLWEG, S., *et al.* "Is cumulative fossil energy demand a useful indicator for the environmental performance of products?", **Environmental Science and Technology**, 2006. DOI: 10.1021/es051689g. .
- HUMPHRIES, E., LEE, S. J. "Evaluation of pavement preservation and maintenance activities at general aviation airports in Texas practices, perceived effectiveness, costs, and planning", **Transportation Research Record**, 2015. DOI: 10.3141/2471-07. .
- IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). **Sistema de contas regionais: Brasil 2016**. . Rio de Janeiro, Brasil, [s.n.], 2018.
- ICAO (INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION). **Airport Services Manual Part 2: Pavement Surface Conditions**. . Montréal, Canadá, [s.n.], 2002.
- IES (INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY). **Carbon Footprint - What it is and how to measure it**. Ispra, Itália, European Commission, 2009.
- INFRAMÉRICA. **Dados e informações**. 2020. O Aeroporto. Disponível em: <https://www.bsb.aero/br/o-aeroporto/sobre-o-aeroporto/dados-e-informacoes/>. Acesso em: 5 jun. 2020.
- IQBAL ALI, A., SEIFORD, L. M. "Translation invariance in data envelopment analysis", **Operations Research Letters**, 1990. DOI: 10.1016/0167-6377(90)90061-9. .
- IRFAN, M., KHURSHID, M. B., IQBAL, S., *et al.* "Framework for airfield pavements management—an approach based on cost-effectiveness analysis", **European Transport Research Review**, v. 7, n. 2, 2015. DOI: 10.1007/s12544-015-0165-5. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s12544-015-0165-5>.
- ISLAM, S., PONNAMBALAM, S. G., LAM, H. L. "Review on life cycle inventory: methods, examples and applications", **Journal of Cleaner Production**, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.05.144. .
- ISMAIL, N., ISMAIL, A., ATIQ, R. "An overview of expert systems in pavement management", **European Journal of Scientific Research**, 2009. .
- ISO (INTERNATIONAL STANDARDIZATION ORGANIZATION). **Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework (ISO 14040:2006)**. . Genebra, Suíça, [s.n.], 2006.
- ISO (INTERNATIONAL STANDARDIZATION ORGANIZATION). **Greenhouse gases (ISO 14064)**. . Genebra, Suíça, [s.n.], 2018.
- JIANG, Y., ZHAO, G., LI, S. "Comparison of software packages for life cycle cost and benefit analysis of highway projects". 2012. **Anais [...]** [S.l: s.n.], 2012. p. 85–100. DOI: 10.1061/9780784412299.0012.
- JINGNING, Y. "The evaluation model of the bridge approach design scheme based on the life". 2015. **Anais [...]** Nanchang, China, ICICTA, 2015.

- JONES, H. L., MOURA, F., DOMINGOS, T., "Transportation Infrastructure Project Evaluation: Transforming CBA to Include a Life Cycle Perspective". **World Sustainability Series**, [S.l: s.n.], 2018. . DOI: 10.1007/978-3-319-63007-6_46.
- KARLSSON, C. S. J., MILIUTENKO, S., BJÖRKLUND, A., *et al.* "Life cycle assessment in road infrastructure planning using spatial geological data", **International Journal of Life Cycle Assessment**, 2017. DOI: 10.1007/s11367-016-1241-3. .
- KEOLEIAN, G. A., SPITZLEY, D. V. **Sustainability science and engineering**. Amsterdã, Holanda, Elsevier, 2006.
- KHURSHID, M. B., IRFAN, M., LABI, S. "Comparison of methods for evaluating pavement interventions: Evaluation and case study", **Transportation Research Record**, n. 2108, p. 25–36, 2009. DOI: 10.3141/2108-03. .
- KULIKOWSKI, J. "LCA case study for O'Hare international airport taxiway A&B rehabilitation". 2017. **Anais [...]** Champaign, IL, USA, CRC Press, 2017. p. 89–101. DOI: 10.1201/9781315159324-11.
- LAO, Y., LIU, L. "Performance evaluation of bus lines with data envelopment analysis and geographic information systems", **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 33, n. 4, p. 247–255, 2009. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2009.01.005. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2009.01.005>.
- LAURENT, A., OLSEN, S. I., HAUSCHILD, M. Z. "Carbon footprint as environmental performance indicator for the manufacturing industry", **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, 2010. DOI: 10.1016/j.cirp.2010.03.008. .
- LAURENT, Alexis, OLSEN, S. I., HAUSCHILD, M. Z. "Limitations of carbon footprint as indicator of environmental sustainability", **Environmental Science and Technology**, v. 46, n. 7, p. 4100–4108, 2012. DOI: 10.1021/es204163f. .
- LEDELL, E. **h2o: R Interface for "H2O"**. . [S.l: s.n.], , 2019
- LIAW, A., WIENER, M. "Classification and Regression by randomForest", **R News**, 2002. .
- LINS, M. P. E., MEZA, L. A. **Análise Envoltória de Dados e perspectivas de integração no ambiente do Apoio à Decisão**. Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, 2000.
- LIU, R., SMARTZ, B. W., DESCHENEUX, B. "LCCA and environmental LCA for highway pavement selection in Colorado", **International Journal of Sustainable Engineering**, v. 8, n. 2, p. 102–110, 2015. DOI: 10.1080/19397038.2014.958602. .
- LIU, X., CUI, Q., SCHWARTZ, C. W. "Introduction of mechanistic-empirical pavement design into pavement carbon footprint analysis", **International Journal of Pavement Engineering**, v. 19, n. 9, p. 763–771, 2018. DOI: 10.1080/10298436.2016.1205748. .
- LOIJOS, A., SANTERO, N., OCHSENDORF, J. "Life cycle climate impacts of the US concrete pavement network", **Resources, Conservation and Recycling**, 2013. DOI: 10.1016/j.resconrec.2012.12.014. .
- LOPRENCIPE, G., ZOCCALI, P. "Comparison of methods for evaluating airport pavement roughness", **International Journal of Pavement Engineering**, v. 20, n. 7, p. 782–791, 2019. DOI: 10.1080/10298436.2017.1345554. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1345554>.

- MACEDO, M. C. **Estudo para a base técnica de um sistema de gerência de pavimentos para redes regionais de aeroportos**. 2005. Instituto Tecnológico da Aeronáutica, 2005.
- MADANAT, S., MISHALANI, R., IBRAHIM, W. H. W. "Estimation of Infrastructure Transition Probabilities from Condition Rating Data", **Journal of Infrastructure Systems**, 1995. DOI: 10.1061/(asce)1076-0342(1995)1:2(120). .
- MAURO, R., GUERRIERI, M. "Comparative life-cycle assessment of conventional (double lane) and non-conventional (turbo and flower) roundabout intersections", **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 48, p. 96–111, 2016. DOI: 10.1016/j.trd.2016.08.011. .
- MAZUMDER, M., KIM, H. H., LEE, S.-J., *et al.* "Economic Analysis of Crack Treatment Methods Using HDM-III Modeling", **International Journal of Civil Engineering**, v. 17, n. 11A, p. 1739–1751, nov. 2019. DOI: 10.1007/s40999-019-00457-8. .
- MEA (MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT). **Ecosystems and Human Well-being: Synthesis**. Washington, EUA, Island Press, 2005.
- MELLO, J. C. C. B. S. de, MEZA, L. A., GOMES, E. G., *et al.* "Análise de envoltória de dados no estudo da eficiência e dos benchmarks para companhias aéreas brasileiras", **Pesquisa Operacional**, v. 23, n. 2, p. 325–345, 2003. DOI: 10.1590/s0101-74382003000200005. .
- MELLO, J. C. C. B. S. de, MEZA, L. A., GOMES, E. G., *et al.* "Curso de Análise Envoltória de Dados". 2005. **Anais [...]** [S.l.: s.n.], 2005.
- MEYER, D., DIMITRIADOU, E., HORNIK, K., *et al.* **e1071: Misc Functions of the Department of Statistics**. . [S.l.], Probability Theory Group (Formerly: E1071). , 2019
- MILANI, P., VIEIRA, G. B. B., MULINAS, A. M., *et al.* "Análise da relação entre modelo de gestão portuária e eficiência em portos de contêineres", **Revista Gestão Industrial**, v. 11, n. 2, p. 1–25, 2015. DOI: 10.3895/gi.v11n2.1956. .
- MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES PORTOS E AVIAÇÃO CIVIL. **Plano aeroviário nacional 2018-2038**. . Brasília, Brasil, [s.n.], 2018. Disponível em: https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/centrais-de-conteudo/pan2018_ebook.pdf.
- MIRZA, S., ALI, M. S. "Infrastructure crisis — A proposed national infrastructure policy for Canada", **Canadian Journal of Civil Engineering**, 2017. DOI: 10.1139/cjce-2016-0468. .
- MISHAN, E. J., QUAH, E. **Cost-Benefit Analysis**. 5. ed. Abingdon, Inglaterra, Routledge, 2007.
- MOHAMMED, A. A., AMBAK, K., MOSA, A. M., *et al.* "Expert system in engineering transportation: A review", **Journal of Engineering Science and Technology**, 2019. .
- MORETTI, L., MANDRONE, V., D'ANDREA, A., *et al.* "Comparative “from cradle to gate” life cycle assessments of Hot Mix Asphalt (HMA) materials", **Sustainability (Switzerland)**, 2017. DOI: 10.3390/su9030400. .
- MUKHERJEE, A., STAWOWY, B., CASS, D. "Project Emission Estimator: tool for contractors and agencies for assessing greenhouse gas Emissions of Highway

- construction Projects", **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, 2013. .
- MULRY, B., JORDAN, M., O'BRIEN, D. "Automated Pavement Condition Assessment Using Laser Crack Measurement System (LCMS) on Airfield Pavements in Ireland". 2015. **Anais** [...] Washington, EUA, ICMPA, 2015.
- NASCIMENTO, F., GOUVEIA, B., DIAS, F., *et al.* "A method to select a road pavement structure with life cycle assessment", **Journal of Cleaner Production**, v. 271, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122210. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122210>.
- ONU (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS). **Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)**. Nova Iorque, EUA, ONU, 1998.
- PANTIGOSO, J. F. G. **Uso dos Sistemas de Informação Geográfica para Integração da Gerência de Pavimentos Urbanos com as Atividades das Concessionárias de Serviços Públicos**. 1998. Universidade de São Paulo, 1998.
- PANTUSO, A., LOPRENCIPE, G., BONIN, G., *et al.* "Analysis of pavement condition survey data for effective implementation of a network level pavement management program for Kazakhstan", **Sustainability (Switzerland)**, 2019. DOI: 10.3390/su11030901. .
- PASETTO, M., BALIELLO, A., GIACOMELLO, G., *et al.* "Sustainable solutions for road pavements: A multi-scale characterization of warm mix asphalts containing steel slags", **Journal of Cleaner Production**, 2017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.07.212. .
- PASTOR, J. T. "Translation invariance in data envelopment analysis: A generalization", **Annals of Operations Research**, 1996. DOI: 10.1007/BF02187295. .
- PIGOZZI, F., CONI, M., PORTAS, S., *et al.* "Implementation of deflection bowl measurements for structural evaluations at network level of airport pavement management system". 2014. **Anais** [...] Galloway, EUA, FAA, 2014.
- PILGER, J. D., MACHADO, Ê. L., DE ASSIS LAWISCH-RODRIGUEZ, A., *et al.* "Environmental impacts and cost overrun derived from adjustments of a road construction project setting", **Journal of Cleaner Production**, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120731. .
- PITTENGER, D. M. "Evaluating sustainability of selected airport pavement treatments with life-cycle cost, raw material consumption, and greenroads standards", **Transportation Research Record**, n. 2206, p. 61–68, 2011. DOI: 10.3141/2206-08. .
- PULUGURTA, H., SHAO, Q., CHOU, Y. J. "Pavement condition prediction using Markov process", **Journal of Statistics and Management Systems**, 2009. DOI: 10.1080/09720510.2009.10701426. .
- R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. . Viena, Áustria, R Foundation for Statistical Computing. , 2019
- RANGARAJU, P. R., AMIRKHANIAN, S., GUVEN, Z. **Life Cycle Cost Analysis for Pavement Type Selection**. . Clemson, EUA, [s.n.], 2008.
- REZA, B., SADIQ, R., HEWAGE, K. "A fuzzy-based approach for characterization of

- uncertainties in emergy synthesis: An example of paved road system", **Journal of Cleaner Production**, 2013. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.06.061. .
- RODRIGUE, J.-P. **The Geography of Transport Systems**. 5. ed. New York, USA, Routledge, 2020.
- RODRIGUES, R. M. **Projeto e gerência de pavimentos**. São José dos Campos, Brasil, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2007.
- SANTERO, N. J., HORVATH, A. "Global warming potential of pavements", **Environmental Research Letters**, v. 4, n. 3, 2009. DOI: 10.1088/1748-9326/4/3/034011. .
- SANTOS, J., BRESSI, S., CERESO, V., *et al.* "SUP&R DSS: A sustainability-based decision support system for road pavements", **Journal of Cleaner Production**, v. 206, p. 524–540, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.08.308. .
- SANTOS, J., BRYCE, J., FLINTSCH, G., *et al.* "A life cycle assessment of in-place recycling and conventional pavement construction and maintenance practices", **Structure and Infrastructure Engineering**, 2015. DOI: 10.1080/15732479.2014.945095. .
- SANTOS, J., FERREIRA, A., FLINTSCH, G. "A life cycle assessment model for pavement management: Methodology and computational framework", **International Journal of Pavement Engineering**, 2015a. DOI: 10.1080/10298436.2014.942861. .
- SANTOS, J., FERREIRA, A., FLINTSCH, G. "A life cycle assessment model for pavement management: Road pavement construction and management in Portugal", **International Journal of Pavement Engineering**, 2015b. DOI: 10.1080/10298436.2014.942862. .
- SANTOS, J., FERREIRA, A., FLINTSCH, G. "A multi-objective optimization-based pavement management decision-support system for enhancing pavement sustainability", **Journal of Cleaner Production**, v. 164, p. 1380–1393, 2017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.07.027. .
- SANTOS, J., FLINTSCH, G., FERREIRA, A. "Environmental and economic assessment of pavement construction and management practices for enhancing pavement sustainability", **Resources, Conservation and Recycling**, v. 116, p. 15–31, 2017. DOI: 10.1016/j.resconrec.2016.08.025. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.08.025>.
- SARKIS, J., "Preparing your data for DEA". **Modeling Data Irregularities and Structural Complexities in Data Envelopment Analysis**, [S.l.: s.n.], 2007. . DOI: 10.1007/978-0-387-71607-7_17.
- SAYERS, M. W., GILLESPIE, T. D., PATERSON, W. D. O. **Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements**. [S.l.: s.n.], 1986.
- SEGAL, M. R. "Machine Learning Benchmarks and Random Forest Regression", **Biostatistics**, 2004. .
- SEXTON, T. R., SILKMAN, R. H., HOGAN, A. J. "Data envelopment analysis: Critique and extensions", **New Directions for Program Evaluation**, 1986. DOI: 10.1002/ev.1441. .
- SHAH, Y. U., JAIN, S. S., TIWARI, D., *et al.* "Modeling the pavement serviceability

- index for urban roads in Noida", **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 6, n. 1, p. 66–72, 2013. DOI: 10.6135/ijprt.org.tw/2013.6(1).66. .
- SHAHIN, M. Y., "M&R Guidelines - Validation and Field Applications". **Development of a Pavement Maintenance Management System**, Champaign, Construction Engineering Research Laboratory, 1979. .
- SHAHIN, M. Y. **Pavement management for airports, roads, and parking lots**. 2. ed. Nova Iorque, EUA, SPRINGER, 2005.
- SHAHIN, M. Y., WALTHER, J. A. **Pavement Maintenance Management for Roads and Streets Using the PAVER System**. Champaign, EUA, US Army Corps of Engineers, 1990.
- SHARMA, A., SAXENA, A., SETHI, M., *et al.* **Life cycle assessment of buildings: A review**. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. [S.l: s.n.]. , 2011
- SOARES DE MELLO, J. C. C. B., GOMES, E. G., MEZA, L. A., *et al.* "DEA advanced models for geometric evaluation of used lathes", **WSEAS Transactions on Systems**, 2008. .
- SUMAN, S. K., SINHA, S. "Pavement condition forecasting through artificial neural network modelling", **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, v. 2, n. 11, p. 474–478, 2012. .
- SUN, S., WEI, Y., TSUI, K. L., *et al.* "Forecasting tourist arrivals with machine learning and internet search index", **Tourism Management**, 2019. DOI: 10.1016/j.tourman.2018.07.010. .
- SWAMI, M., PARIDA, M. "Comparative appraisal of metro stations in Delhi using data envelopment analysis in a multimodal context", **Journal of Public Transportation**, v. 18, n. 3, p. 29–51, 2015. DOI: 10.5038/2375-0901.18.3.3. .
- TAREFDER, R. A., RAHMAN, M. M. "Development of system dynamic approaches to airport pavements maintenance", **Journal of Transportation Engineering**, v. 142, n. 8, p. 04016027, 2016. DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000856. .
- TCU (TRIBUNAL DE CONTAS DA UNIÃO). **Relatório de fiscalização - sintético (TC 003.768/2014-7)**. . Brasília, Brasil, [s.n.], 2014.
- THERNEAU, T., ATKINSON, B. **rpart: Recursive Partitioning and Regression Trees**. . [S.l: s.n.]. , 2019
- TRAN, N. A., SHIVELY, G., PRECKEL, P. "A new method for detecting outliers in Data Envelopment Analysis", **Applied Economics Letters**, v. 17, n. 4, p. 313–316, 2010. DOI: 10.1080/13504850701765119. .
- TSAI, C. F. "Feature selection in bankruptcy prediction", **Knowledge-Based Systems**, v. 22, n. 2, p. 120–127, 2009. DOI: 10.1016/j.knosys.2008.08.002. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.knosys.2008.08.002>.
- USDOT (UNITED STATES DEPARTMENT OF TRANSPORTATION). **Potential impacts of climate change on U.S. Transportation**. Washington, EUA, Transportation Research Board, 2008.
- VIDAL, R., MOLINER, E., MARTÍNEZ, G., *et al.* "Life cycle assessment of hot mix asphalt and zeolite-based warm mix asphalt with reclaimed asphalt pavement", **Resources, Conservation and Recycling**, 2013. DOI: 10.1016/j.resconrec.2013.02.018. .

- WALLS, J., SMITH, M. R. **Life-Cycle cost analysis in pavement design (FHWA-SA-98-079)**. . Washington, EUA, [s.n.], 1998.
- WANG, H., AL-SAAD, I., LU, P., *et al.* **Quantifying greenhouse gas emission of asphalt pavement preservation at construction and use stages using life-cycle assessment. International Journal of Sustainable Transportation**. Department of Civil and Environmental Engineering, Rutgers University, Piscataway, NJ, United States, [s.n.], 2019
- WANG, K. C. P., ZANIEWSKI, J., WAY, G. "Probabilistic behavior of pavements", **Journal of Transportation Engineering**, 1994. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(1994)120:3(358). .
- WENNSTRÖM, J., KARLSSON, R. "Possibilities to reduce pavement rehabilitation cost of a collision-free road investment using an LCCA design procedure", **International Journal of Pavement Engineering**, 2016. DOI: 10.1080/10298436.2014.993191. .
- WHYTE, A. **Life-cycle Cost Analysis of Built Assets - LCCA Framework**. 1. ed. Saarbrücken, Alemanha, VDM, 2015.
- WRI (WORLD RESOURCES INSTITUTE), WBCSD (WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT). **The GHG Protocol for Project Accounting**. . [S.l.: s.n.], 2005. Disponível em: <https://ghgprotocol.org/standards/project-protocol>.
- YAMADA, Y., MATSUI, T., SUGIYAMA, M. "AN INEFFICIENCY MEASUREMENT METHOD FOR MANAGEMENT SYSTEMS", **Journal of the Operations Research Society of Japan**, 1994. DOI: 10.15807/jorsj.37.158. .
- YANG, W., WANG, J., WANG, R. "Research and application of a novel hybrid model based on data selection and artificial intelligence algorithm for short term load forecasting", **Entropy**, 2017. DOI: 10.3390/e19020052. .
- YU, B, LU, Q. "Estimation of albedo effect in pavement life cycle assessment", **Journal of Cleaner Production**, v. 64, p. 306–309, 2014. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.07.034. .
- YU, B, LU, Q. "Life cycle assessment of pavement: Methodology and case study", **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 17, n. 5, p. 380–388, 2012. DOI: 10.1016/j.trd.2012.03.004. .
- YU, B, LU, Q., XU, J. "An improved pavement maintenance optimization methodology: Integrating LCA and LCCA", **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 55, p. 1–11, 2013. DOI: 10.1016/j.tra.2013.07.004. .
- YU, Bin, WANG, S., GU, X. "Estimation and uncertainty analysis of energy consumption and CO2 emission of asphalt pavement maintenance", **Journal of Cleaner Production**, 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.04.068. .
- ZHANG, H., LEPECH, M. D., KEOLEIAN, G. A., *et al.* "Dynamic life-cycle modeling of pavement overlay systems: Capturing the impacts of users, construction, and roadway deterioration", **Journal of Infrastructure Systems**, v. 16, n. 4, p. 299–309, 2010. DOI: 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000017. .
- ZHU, J. **Quantitative Models for Performance Evaluation and Benchmarking**. 3. ed. Cham, Springer International Publishing, 2014. v. 213. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-06647-9>. (International Series in Operations Research & Management Science).

- ZIMMERMAN, K. A., SMITH, K. D., GROGG, M. G. "Applying economic concepts from life-cycle cost analysis to pavement management analysis", **Transportation Research Record**, 2000. DOI: 10.3141/1699-08. .
- ZOU, B., MADANAT, S. "Incorporating Delay Effects into Airport Runway Pavement Management Systems", **Journal of Infrastructure Systems**, 2012. DOI: 10.1061/(asce)is.1943-555x.0000086. .
- ZUPIC, I., ČATER, T. "Bibliometric Methods in Management and Organization", **Organizational Research Methods**, v. 18, n. 3, p. 429–472, 2015. DOI: 10.1177/1094428114562629. .