

Validação de um método indireto de auscultação de degradações para avaliação da qualidade de pavimentos aeroportuários

Ianca Teixeira Feitosa

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil: Geotecnia e Ambiente
(Mestrado integrado)

Orientador: Prof.^a Doutora Bertha Maria Batista dos Santos
Co-orientador: Prof. Doutor Pedro Gabriel de Faria Lapa Barbosa de Almeida

junho de 2020

Dedicatória

Aos meus pais,
Ruth Feitosa e Ubirajara Teixeira.

Agradecimentos

A realização desta dissertação contou com importantes apoios e incentivos sem os quais não teria se tornado uma realidade e aos quais estarei eternamente grata.

Agradeço à Professora Doutora Bertha Maria Batista dos Santos, pela sua orientação, total apoio, disponibilidade, competência em conduzir o processo de construção da dissertação, colaboração no solucionar de dúvidas e problemas que surgiram ao longo da sua realização, por todo incentivo e crescimento acadêmico que me proporcionou. Agradeço também ao Professor Doutor Pedro Gabriel de Faria Lapa Barbosa Almeida, pela sua orientação, disponibilidade, atenção e dedicação à construção deste trabalho.

Agradeço especialmente ao meus pais, Ruth e Bira, por serem exemplos de coragem, pelo apoio incondicional, incentivo, amizade, paciência, educação e imensa ajuda na superação de obstáculos que ao longo desta caminhada foram surgindo. Ficar longe de vocês foi a parte mais difícil dessa jornada, mas o amor incalculável com que me nutriram em todos os bons e maus momentos, durante toda minha vida, me deram forças para ficar aqui e caminhar para os meus objetivos profissionais e crescimento pessoal. Essa é uma conquista nossa, por inteiro.

Agradeço aos meus quatro irmãos, Iuri, Ingrid, Luiz Tobias e João Lucas, presentes de Deus na minha vida, obrigada por me fazerem rir quando eu estava triste e me transmitirem tanto amor, cada um do seu jeitinho. Eu amo muito vocês.

Ao meu time de super-tios, Rúbia, Celso, Raquel e Marcelo que me apoiaram desde a infância na vida acadêmica e me preenchem com seu amor. Aos meus avós queridos, Zêra, Neuma, Luis Rufino e Ninosa que me apoiaram mesmo distantes com o coração apertado de saudade e preocupação.

Ao meu amado Tio Riva que foi o responsável por me ingressar neste curso e um importante pilar da minha vida. Aqui deixo a ti toda minha gratidão por me acompanhar sempre. Sinto sua vibração e felicidade por todas as minhas conquistas.

Às minhas melhores amigas, Alicia e Bárbara, que me acompanharam durante todo este processo, me ouvindo e me fazendo ouvir quando eu mais precisava, me apoiando e acompanhando nos dias tristes e felizes, uma fisicamente e outra virtualmente, mas com a mesma intensidade e amor. Eu não teria conseguido sem o apoio de vocês.

Às minhas amigas Laís, Amanda, Malu, Sarah, Saffana, Sara Natsumi, André, Dimitri, Letícia e Camila, que me deram apoio, ânimo, abraços e acreditaram no meu potencial quando eu mesma não acreditei. À Manu, por ter me auxiliado nas dúvidas e me deixado mais próxima das minhas raízes com seu sotaque gostoso, talentos culinários que só uma baiana tem e interior tão parecido com o meu.

Aos meus primos Tadeu e Cita que participaram de momentos emocionantes ao meu lado, me apoiando e dando força nos momentos difíceis e também nos momentos felizes que passei no ano de 2019. Vocês foram parte essencial dessa jornada.

Por fim, agradeço a DEUS, pois sem ele eu não teria nenhuma das pessoas mencionadas acima, não teria forças ou todas as dádivas já proporcionadas a mim. Muito obrigada por ser minha base, me acompanhar cada segundo do meu dia e especialmente por essa conquista.

Resumo

O presente estudo tem como objetivo contribuir para melhorar o desempenho da componente “Avaliação do estado dos pavimentos” de um Sistema de Gestão de Pavimentos Aeroportuários (SGPA), através da validação de um sistema de levantamento indireto com recurso a veículo equipado, de baixo custo, que permite que os dados de degradação da superfície do pavimento sejam recolhidos rapidamente. Esta é uma componente particularmente importante do SGPA, uma vez que a partir dos dados recolhidos é possível avaliar o estado dos pavimentos e definir estratégias de intervenção.

Para o efeito, o estudo apresenta dois métodos para recolha de dados de degradações superficiais de pavimentos flexíveis aeroportuários, aplicados na pista principal do Aeroporto Internacional Amílcar Cabral (AIAC), localizado na Ilha do Sal, Cabo Verde. Os métodos utilizados foram a inspeção visual tradicional realizada a pé e o método indireto de inspeção com recurso a veículo equipado com captura e gravação de imagem, feixes lasers e dispositivos de localização (GNSS) que se pretende validar.

Para atingir o objetivo do trabalho, é introduzida a metodologia de gestão prática e sustentada de pavimentos aeroportuários, descrevendo as principais componentes de um SGPA; o processo para a obtenção do *Pavement Condition Index* (PCI), de acordo com a norma ASTM D 5340-12 (2012); a evolução e a importância da escolha adequada dos métodos de auscultação de pavimentos; e o procedimento de análise estatística de comparação entre duas amostras. Os princípios e metodologias descritos foram aplicados no desenvolvimentos do caso de estudo.

A validação do método indireto de recolha de dados é analisada por comparação estatística dos dados coleta dos sobre as degradações superficiais do pavimento, precisamente a densidade da degradação por nível de gravidade, e os valores do índice PCI obtidos com os dois métodos. O estudo evidenciou dois aspetos que precisam ser aprimorados no sistema proposto, a qualidade das imagens capturadas para identificar degradações com nível de gravidade baixo e o treinamento do inspetor para alocação adequada dos níveis de gravidade durante a análise de imagens. Diferenças estatisticamente não significativas entre os conjuntos de resultados, validaram o método indireto proposto, resultando em vantagens significativas em relação à quantidade de área de pavimento inspecionada (maior), tempo de inspeção (menor), custo da recolha de dados, processamento e visualização de resultados (em um SIG), possibilidade de reavaliação dos dados (possível no método indireto) e controle de qualidade na identificação e medição das degradações.

Tendo em conta os resultados obtidos, é ainda apresentado um estudo exploratório das melhorias introduzidas na estrutura e equipamento utilizado no método indireto de levantamento, onde é feita uma comparação da qualidade de imagem captada no levantamento das degradações observadas e dados coletados sobre as degradações, com vista à validação completa do método de auscultação de degradações da superfície de pavimentos proposto.

Palavras-chave

Sistema de Gestão de Pavimentos Aeroportuários (SGPA), Métodos de Auscultação de Pavimentos, Degradações de Pavimentos, Recolha de Dados, Processamento de Imagem, Comparação Estatística.

Abstract

The present study aims to contribute to improve the performance of the “Condition Assessment” component of an Airport Pavement Management System (APMS). To achieve this objective a validation of an indirect low-cost inspection method with equipped vehicle, which allows fast pavement surface distress data collection, is performed. This is a particularly important component of an APMS, as the collected data is used to evaluate the pavement condition and subsequently to define intervention strategies.

For this purpose, two methods to collect airport pavement distress data were applied to assess the pavement condition of the main runway of the Amílcar Cabral International Airport (ACIA), located at Sal Island, Cabo Verde. The methods used were traditional visual inspection on-foot and the proposed indirect inspection method using a vehicle equipped with image capture and recording, lasers and geolocation devices.

The study presents practical aspects of airports pavements management, including a description of the main components of APMS; the Pavement Condition Index (PCI) adopted methodology (ASTM D 5340-12 standard); the evolution of pavement inspection methods and the importance of choosing the appropriated one; and the statistical analysis procedure used to compare results sampled data collected by the traditional method and with the in-vehicle system.

Validation of the indirect in-vehicle data collection method by statistical comparison is performed using the pavement distress density data by severity level and PCI values obtained with both methods. The study revealed two aspects that need to be improved in the proposed in-vehicle system: the quality of the captured images to allow a better identification of distresses on low severity levels; and inspector training for the appropriate allocation of severity levels during image analysis. The differences found between the two sets of results are not statistically significant, validating the proposed indirect method. This results in significant advantages related to pavement area inspected (larger), inspection time (shorter), cost of data collection, processing and visualization of results (in a GIS), possibility of data revaluation (possible on the indirect method) and distresses identification and measure quality control.

Based on the limitations identified, an exploratory study of improvements introduced on the equipment and support structure used on the indirect inspection method is also presented. The comparison between the captured image quality obtained with the initial and improved system and pavement distresses data allows to anticipate full validation of the proposed pavements surface distresses inspection method.

Keywords

Airport Pavement Management Systems (APMS), Pavement Distress Detection, Pavement Distresses, Data Collection, Image Processing, Statistical Comparison.

Índice

Dedicatória	iii
Agradecimentos	v
Resumo	viii
Palavras-chave	ix
Abstract	xi
Keywords	xi
Índice	xiii
Lista de Figuras	xviii
Lista de Tabelas	xxi
Lista de Expressões	xxiii
Lista de Acrónimos	xxv
1 Introdução	28
1.1 Enquadramento e justificação do tema	28
1.2 Objetivos	29
1.3 Estrutura da dissertação	29
2 Sistema de Gestão de Pavimentos Aeroportuários	31
2.1 Enquadramento	31
2.2 Pavimentos aeroportuários	32
2.3 Sistemas de Gestão de Pavimentos Aeroportuários	36
2.4 Estrutura de um SGPA	38
2.4.1 Inventário da rede	39
2.4.2 Avaliação do estado do pavimento	40
2.4.2.1 Rede de pavimentos aeroportuários	41
2.4.2.2 Determinação do número mínimo de unidades de amostra a observar	41
2.4.2.3 <i>Pavement Condition Index</i> – PCI	42
2.4.3 Base de dados	43
2.4.4 Análise de dados – plano e programa de estratégias de manutenção	44

2.4.4.1	Desenvolvimento de modelos de previsão da evolução do estado do pavimento	45
2.4.4.2	Determinação das prioridades de conservação do pavimento	45
2.4.4.3	Análise económica de estratégias de conservação dos pavimentos	46
2.4.5	Resultados do sistema	46
2.4.6	Ciclo de realimentação	47
3	Auscultação de Dados em Pavimentos Aeroportuários	48
3.1	Preparação da rede de pavimentos para o levantamento das degradações	49
3.2	Degradações superficiais em pavimentos aeroportuários	50
3.3	Técnicas de auscultação	57
3.3.1	Levantamento a pé.....	57
3.3.2	Levantamento em veículo equipado.....	60
3.3.2.1	VIZIROAD	60
3.3.2.2	Multi Functional Vehicle (MFV).....	61
3.3.2.3	ROMDAS (<i>ROad Measurement Data Acquisition System</i>)	63
3.3.3	Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) com a tecnologia <i>Light Detection And Ranging</i> (LiDAR)	67
4	Análise Estatística para Comparação de duas Amostras.....	69
4.1	Introdução	69
4.2	Variáveis	70
4.2.1	Variáveis qualitativas	70
4.2.2	Variáveis quantitativas.....	70
4.3	Amostra	71
4.3.1	Amostragem probabilística ou aleatória	71
4.3.2	Amostragem não-probabilística ou não-aleatória.....	72
4.3.3	Amostras independentes e amostras emparelhadas	73
4.4	Análise estatística para comparação de duas amostras	73
4.4.1	Definição das hipóteses.....	73
4.4.2	Definição da probabilidade de significância (α) para determinação da regra de decisão	74
4.4.3	Identificação das principais características da amostra e da sua distribuição	75

4.4.4	Cálculo estatístico do teste de comparação a adotar no estudo das amostras	76
4.4.4.1	Testes de hipóteses paramétricos para duas amostras	76
	<i>T-test para duas amostras independentes</i>	77
	<i>T-test para duas amostras emparelhadas</i>	79
	<i>F-test</i>	80
4.4.4.2	Testes de hipóteses não-paramétricos para duas amostras	81
	<i>Teste de Wilcoxon para duas amostras emparelhadas</i>	82
4.4.4.2.1	Teste de Mann-Whitney para comparar amostras independentes	82
4.4.4.2.2	Teste de independência Qui-Quadrado.....	83
4.4.5	Determinação da validade ou não da amostra.....	85
5	Caso de Estudo.....	86
5.1	Introdução	86
5.2	Sistema móvel multifuncional de baixo custo	87
5.3	Localização geográfica	89
5.4	Segmentação da pista.....	93
5.5	Auscultação dos pavimentos	97
5.5.1	Levantamento visual tradicional (a pé).....	97
5.5.2	Levantamento em veículo equipado com dispositivos de varrimento laser e de captação e registo de dados de imagem e georreferenciação	99
5.6	Análise comparativa dos resultados obtidos pela auscultação dos pavimentos	101
5.6.1	Comparação inicial dos dados	101
5.6.2	Análise estatística de comparação das duas amostras	108
5.6.2.1	Testes de normalidade	109
5.6.2.2	Análise estatística comparativa	114
5.7	Estudo exploratório das melhorias introduzidas no método de auscultação de pavimentos proposto	115
5.7.1	Levantamento visual tradicional a pé e com veículo equipado melhorado	117
5.7.2	Análise dos resultados.....	119
6.	Conclusões e Trabalhos Futuros	123
7.	Referências Bibliográficas	128
8.	Anexos	133

- I. Planta do "Lado Ar" do Aeroporto Internacional Amílcar Cabral
- II. Segmentação da rede de pavimentos do Aeroporto Internacional Amílcar Cabral
- III. Localização das unidades de amostras inspecionadas
- IV. Representação gráfica do PCI do levantamento tradicional (a pé)
- V. Representação gráfica do PCI do levantamento em veículo
- VI. Curvas de distribuição dos dados de densidade da degradação "Pele de Crocodilo"
- VII. Curvas de distribuição dos dados de densidade da degradação "Reparações e Cortes Técnicos"
- VIII. Curvas de distribuição dos dados de densidade da degradação "Desagregação Superficial do Agregado"
- IX. Curvas de distribuição dos dados de densidade da degradação "Desagregação Superficial do Mástique em Misturas Betuminosas Densas"

Lista de Figuras

Figura 2.1 – a) Distribuição das cargas do tráfego no pavimento flexível; b) Distribuição das cargas do tráfego no pavimento rígido (adaptado de AC 150/5380-6C, 2014).	33
Figura 2.2 - Estrutura típica de um pavimento rígido (adaptado de AC 150/5380-6C, 2014)...	34
Figura 2.3 - Estrutura típica de um pavimento flexível (adaptado de AC 150/5380-6C, 2014).	35
Figura 2.4 - Evolução do estado do pavimento aeroportuário ao longo do seu ciclo de vida (adaptado de Irfan, et al., 2015).....	37
Figura 2.5 - Componentes de um Sistema de Gestão de Pavimentos Aeroportuários (adaptado de Lima, et al., 2017).....	38
Figura 2.6 - Escala de classificação do PCI (adaptado de AC 150/5380-7B, 2014).	43
Figura 3.1 - Indicadores do estado dos pavimentos aeroportuários: famílias de degradações, degradações, origens e causas (adaptado de Duran, 2015).	51
Figura 3.2 - Inspeção visual tradicional (Lima, 2016).	57
Figura 3.3 - Folha de registo de dados de levantamento do estado de pavimentos flexíveis para uma unidade de amostra (ASTM D5340-12, 2012).....	59
Figura 3.4 - Equipamento VIZIROAD com GPS associado (Horta, et al., 2013).....	61
Figura 3.5 - a) Perfilômetro Laser RPS-III; b) Perfilômetro Laser RPS-IV; c) Veículo Multifuncional (MFV) (adaptado de Dynatest International, 2017).	63
Figura 3.6 - Sistema ROMDAS (adaptado de ROMDAS, 2016).	64
Figura 3.7 - Drone LiDAR quadricóptero mdLiDAR3000 (Microdrones, 2019).....	68
Figura 4.1 - Fluxograma representativo da escolha do teste de hipóteses em função da distribuição das variáveis da amostra.	76
Figura 4.2 - Fluxograma representativo dos testes de hipóteses paramétricos para duas amostras.	77
Figura 4.3 - Fluxograma representativo dos testes de hipóteses não-paramétricos para comparação de duas amostras.....	81
Figura 5.1 - Equipamentos usados no sistema móvel multifuncional de baixo custo desenvolvido no DECA-UBI (Lima, 2016).	87
Figura 5.2 - Localização geográfica da República de Cabo Verde.	90
Figura 5.3 - Localização do Aeroporto Internacional Amílcar Cabral, Ilha do Sal, Cabo Verde.	91
Figura 5.4 - Planta do "Lado Ar" do AIAC (adaptado de Lima, 2016).	92

Figura 5.5 - Segmentação da pista principal do Aeroporto Internacional Amílcar Cabral (Lima, 2016).	95
Figura 5.6 - Numeração das unidades de amostra de parte da secção A (Lima, 2016).	96
Figura 5.7 - Folha de registo de dados de levantamento do estado de pavimentos flexíveis para uma unidade de amostra inspecionada (Lima, 2016).....	98
Figura 5.8 - Folha de registo de dados de levantamento do estado de pavimentos flexíveis para uma unidade de amostra inspecionada (Lima, 2016).....	100
Figura 5.9 - Gráfico de comparação de densidades por degradação pele de crocodilo e por seus respectivos níveis de gravidade.	103
Figura 5.10 - Gráfico de comparação de densidades por degradação reparações e cortes técnicos e por seus respectivos níveis de gravidade.	103
Figura 5.11 - Gráfico de comparação de densidades por degradação desagregação superficial do agregado e por seus respectivos níveis de gravidade.	104
Figura 5.12 - Gráfico de comparação de densidades por degradação desagregação superficial do mástique em misturas betuminosas densas e por seus respectivos níveis de gravidade.	104
Figura 5.13 - Comparação dos valores de PCI obtidos na secção A pelos dois métodos de levantamento (a pé e em veículo) e tendência linear.	106
Figura 5.14 - Comparação dos valores de PCI obtidos na secção B pelos dois métodos de levantamento (a pé e em veículo) e tendência linear.	106
Figura 5.15 - Comparação dos valores de PCI obtidos na secção C pelos dois métodos de levantamento (a pé e em veículo) e tendência linear.	107
Figura 5.16 - Comparação dos valores de PCI obtidos nas secções A, B e C pelos dois métodos de levantamento (a pé e em veículo) e tendência linear.....	108
Figura 5.17 - Curvas de distribuição dos dados de densidade da degradação desagregação superficial do mástique para o nível de gravidade alto.	111
Figura 5.18 - Curvas de distribuição dos valores do índice PCI.	113
Figura 5.19 - Esboço da área da pista do antigo Aeródromo do Município da Covilhã inspecionada.	116
Figura 5.20 - Veículo equipado melhorado.	118
Figura 5.21 - Coordenadas registadas do levantamento em veículo visualizadas no SIG.	119
Figura 5.22 - Comparação de imagens captadas com as câmeras Garmin Elite e Olympus QM-D10MK3.....	120

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Níveis de gravidade das degradações de pavimentos flexíveis aeroportuários (Parte 1).	52
Tabela 3.1 - Níveis de gravidade das degradações de pavimentos flexíveis aeroportuários (Parte 2).....	52
Tabela 3.1 - Níveis de gravidade das degradações de pavimentos flexíveis aeroportuários (Parte 3).	52
Tabela 3.2 - Degradações de pavimentos flexíveis aeroportuários: medição e observações particulares (Parte 1).	55
Tabela 3.2 - Degradações de pavimentos flexíveis aeroportuários: medição e observações particulares (Parte 2).	55
Tabela 3.3 - Módulos disponíveis para o Sistema ROMDAS (Parte 1).	65
Tabela 3.3 - Módulos disponíveis para o Sistema ROMDAS (Parte 1).	65
Tabela 4.1 - Modelos de amostragem probabilística ou aleatória.	72
Tabela 4.2 - Modelos de amostragem não-probabilística ou não-aleatória.	72
Tabela 5.1 - Codificação e segmentação da pista 01-19 do AIAC (adaptado de Lima, 2016). ..	93
Tabela 5.2 - Número de unidades de amostra por secção.	94
Tabela 5.3 - Degradações, níveis de gravidade e densidades observadas no pavimento da pista 01-19 do AIAC, por tipo de levantamento.....	102
Tabela 5.4 - Valores de PCI obtidos para cada unidade de amostra inspecionada e secção da pista (adaptado de Lima, et al., 2017).	105
Tabela 5.5 - Teste de normalidade para as duas abordagens de auscultação dos pavimentos.	109
Tabela 5.6 - Resultados do Teste de Wilcoxon, T-test e F-test.....	114
Tabela 5.7 - Especificações das câmeras.	116
Tabela 5.8 - Degradações observadas no pavimento e densidades por nível de gravidade e tipo de levantamento.	121

Lista de Expressões

Exp. 2.1 - Expressão para determinação do número mínimo de unidades de amostra (n)	42
Exp. 4.1 - Expressão para determinação estatística do teste (T) para amostras independentes	78
Exp. 4.2 - Expressão para a determinação estatística do teste (T) para amostras independentes e de variâncias populacionais homogêneas.....	78
Exp. 4.3 - Expressão para a determinação do desvio-padrão conjunto	78
Exp. 4.4 - Expressão para a determinação do número de graus de liberdade (ν) para variâncias populacionais homogêneas	79
Exp. 4.5 - Expressão para determinação estatística do teste (T) para amostras emparelhadas	80
Exp. 4.6 - Expressão para determinação do valor estatístico (X^2) do teste Qui-Quadrado	84
Exp. 4.7 - Expressão para a determinação da frequência esperada da i -ésima linha, j -ésima coluna	84
Exp. 4.8 - Expressão para a determinação do número de linhas da tabela de contingência	84
Exp. 4.9 - Expressão para a determinação do número de colunas da tabela de contingência	84

Lista de Acrónimos

A	Alto (nível de gravidade de uma degradação)
AC	<i>Advisory Circular</i>
ACN	<i>Aircraft Classification Number</i>
AIAC	Aeroporto Internacional Amílcar Cabral
AIP	<i>Aeronautical Information Publication</i>
ASA	Aeroportos Segurança Aérea S.A.
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
B	Baixo (nível de gravidade de uma degradação)
BBI	<i>Boeing Bump Index</i>
CSRS-PPP	<i>Canadian Spatial Reference System – Precise Point Positioning</i>
Exp.	Expressão
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
FOD	<i>Foreign Object Damage</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite Systems</i>
GVAC	Código ICAO do Aeroporto Internacional Amílcar Cabral
IATA	<i>International Air Transport Association</i>
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i>
ILS	<i>Instrument Landing System</i>
INSS	<i>Inertial Navigation Systems</i>
IRI	<i>International Roughness Index</i>
LCMS	<i>Laser Crack Measurement System</i>
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
LRMS	<i>Laser Rut Measurement System</i>
M	Médio (nível de gravidade de uma degradação)
MFV	<i>Multi Functional Vehicle</i>
M&R	Manutenção e Reabilitação
PCC	<i>Portland Cement Concrete</i>
PCI	<i>Pavement Condition Index</i>
PCN	<i>Pavement Classification Number</i>
PMMS	<i>Pavement Maintenance Management System</i>
RN	<i>Ride Number</i>
ROMDAS	<i>Road Measurement Data Acquisition System</i>
RSP	<i>Road Surface Profiler</i>
SGPA	Sistemas de Gestão de Pavimentos Aeroportuários
SID	Código IATA do Aeroporto Internacional Amílcar Cabral
SIG	Sistema de Informação Geográfica
US	<i>United States</i>

VANTs	Veículos Aéreos Não Tripulados
VOR	Very High Frequency Omnidirectional Radio Range

1 Introdução

1.1 Enquadramento e justificação do tema

Os aeroportos possuem um papel de fundamental importância para a economia e o desenvolvimento das regiões, nações e municípios onde estão localizados, uma vez que garantem um sistema de transporte de mercadorias e passageiros eficiente. A facilidade e eficácia no trâmite de bens e pessoas por todo o mundo levou este meio de transporte a ser cada vez mais utilizado, seja por grandes indústrias, com seus clientes e fornecedores, buscando ampliar a comercialização dos seus produtos, ou pela potencialização do turismo entre as nações. Devido à sua relevância é indispensável garantir os subsídios/financiamento necessário à garantia do seu funcionamento em boas condições.

Os pavimentos aeroportuários são elementos importantes sobretudo para garantir a segurança e o conforto dos seus usuários. Sua constante demanda e utilização exige que estes possuam boas características, uma superfície regular e antiderrapante, consistência estrutural para garantir manobras de pouso e decolagem, aliado ao conforto e segurança para seus usuários e, portanto, para a aeronave (AC 150/5380-6C, 2014).

Muitos problemas advindos de ações que atuam sobre os pavimentos dos aeroportos, como ações relacionadas ao clima, como o gelo-degelo, variação de humidade e temperatura e de operacionalidade diária (tráfego), causam problemas nos pavimentos aeroportuários, diminuindo gradativamente seu desempenho, qualidade e tempo de vida útil (AC 150/5380-6C, 2014).

A partir desse pressuposto, passaram a ser utilizados métodos sistemáticos de gerenciamento dos pavimentos aeroportuários com o objetivo de aumentar o tempo de vida útil do pavimento e garantir um serviço de qualidade.

O desenvolvimento e implementação de um Sistema de Gestão de Pavimentos Aeroportuários (SGPA) possibilita gerir os ativos de forma prática e sustentável, apoiando o administrador na tomada de decisão através da determinação de prioridades, da quantificação de custos e da programação de atividades, o que resulta no desenvolvimento de estratégias economicamente viáveis para a manutenção dos pavimentos (Lima, et al., 2017) (Domingos, et al., 2017).

Tendo por base a adoção de um método sistemático de gerenciamento, um SGPA, que permite auxiliar o administrador na execução das suas principais componentes, o presente trabalho pretende contribuir para a melhoria do desempenho da componente “Levantamento do Estado dos Pavimentos” através do estudo de dois métodos de auscultação das degradações superficiais dos pavimentos, o levantamento tradicional a pé e o levantamento em veículo com recurso a protótipo equipado com dispositivos de varrimento laser e registo de imagem e georreferenciação, com vista à validação deste último. A recolha de dados fidedignos é fundamental para garantir o bom funcionamento das restantes componentes do SGPA e para obtenção de indicações válidas que apoiem a tomada de decisão dos administradores da rede de pavimentos aeroportuários.

A validação do sistema inovador proposto de levantamento em veículo equipado é efetuada por comparação entre os dois métodos de levantamento referidos através da análise estatística de comparação dos dados das degradações superficiais, os quais referem-se ao tipo, densidade e nível de gravidade encontrados nos pavimentos. Somado a isso, também serão comparados os valores referentes ao índice numérico PCI (*Pavement Condition Index*) obtidos nas duas abordagens, que traduz o estado de conservação dos pavimentos aeroportuários, tendo como base os dados coletados na dissertação de mestrado “Sistema de Gestão de Pavimentos Aeroportuários para Cabo Verde” (Lima, 2016).

A validação da abordagem de auscultação proposta foi efetuada pelo desenvolvimento de um caso de estudo em ambiente real, no Aeroporto Internacional Amílcar Cabral (AIAC), situado na Ilha do Sal, em Cabo Verde.

O sistema aeroportuário de Cabo Verde, composto por sete infraestruturas aeroportuárias, é o principal impulsionador da economia do país, visto ser o turismo uma das principais atividades do país. Além disso, a própria geografia do território - um arquipélago - contribui para o aumento da importância do transporte aéreo para o país, já que questões como acessibilidade entre as ilhas e destas com outros países tornam-se demandas centrais para o desenvolvimento económico e a manutenção da vida social dos cidadãos (Lima, et al., 2017).

Ainda neste trabalho, foi efetuado um estudo exploratório de melhorias introduzidas no sistema proposto de levantamento de degradações superficiais de pavimentos aeroportuários com recurso a veículo equipado.

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo central validar a proposta de auscultação dos pavimentos em veículo com recurso a protótipo equipado com dispositivos de varrimento laser e registo de imagem e georreferenciação, através da comparação estatística entre os dados coletados por meio do protótipo desenvolvido na Universidade da Beira Interior (UBI) e aqueles que foram coletados através do levantamento tradicional a pé. O protótipo proposto demanda menos tempo e menos recursos humanos e financeiros que o levantamento realizado a pé. Busca-se, portanto, comprovar a eficácia do primeiro, que, de antemão se afigura uma metodologia mais prática a ser utilizada que o levantamento realizado a pé, sem auxílio de aparato técnico especializado.

1.3 Estrutura da dissertação

O presente trabalho encontra-se dividido em seis capítulos. O primeiro e presente capítulo intitulado “Enquadramento e justificação do tema” consiste na contextualização do tema escolhido, apresentação dos objetivos, metodologia proposta para realização do trabalho e estruturação da dissertação.

O capítulo seguinte intitulado “Sistemas de Gestão de Pavimentos Aeroportuários” é inteiramente dedicado à compreensão de um SGPA, o que engloba a descrição de conceitos relativos aos tipos

de pavimentos, os benefícios e objetivos do SGPA, a sua estrutura geral, seus níveis de gestão e descrição das diferentes componentes desse sistema.

O terceiro capítulo, “Técnicas de Auscultação do Estado Superficial de Pavimentos”, retrata a importância da recolha de informações sobre a rede, o levantamento de dados sobre estado dos pavimentos aeroportuários e a influência da escolha do método de auscultação mais apropriado para o sucesso desta atividade. É então desenvolvida uma revisão bibliográfica sobre o levantamento de informações dos pavimentos aeroportuários, desde a preparação da rede de pavimentos para esta atividade, os tipos de degradações superficiais e as técnicas de auscultação utilizadas ao longo dos anos, a começar pelo levantamento tradicional a pé até a utilização de veículos aéreos não tripulados. Nesta secção é descrito o método em veículo equipado de baixo custo utilizado no caso de estudo do presente trabalho.

O quarto capítulo, “Análise Estatística para Validação de uma Amostra”, apresenta o embasamento teórico sobre a análise estatística adotada, seus objetivos e benefícios de aplicação. Neste contexto, insere-se a descrição de conceitos sobre as variáveis e suas características, sobre as amostras, e sobre a análise estatística comparativa de duas amostras. A análise estatística para duas amostras integra a definição das hipóteses, descrição da probabilidade de significância (α), descrição das principais características da amostra e da sua distribuição, determinação do cálculo do teste estatístico atribuído para análise de duas amostras, concluindo com a validação ou não da amostra.

No capítulo “Caso de Estudo” é apresentado o caso de estudo do presente trabalho, que incide sobre a análise estatística comparativa dos resultados obtidos pelo levantamento do estado superficial dos pavimentos efetuado no Aeroporto Internacional Amílcar Cabral, com recurso a veículo equipamento e levantamento tradicional a pé. Este capítulo integra a caracterização do caso de estudo, a descrição dos procedimentos adotados para o levantamento e tratamento dos dados sobre o pavimento e a análise comparativa estatística dos dados sobre os dois métodos de auscultação, visando validar o sistema inovador proposto. Os dados a serem analisados estatisticamente referem-se a densidade da degradação por nível de gravidade e índice PCI. O capítulo finaliza com um estudo exploratório das melhorias introduzidas no protótipo proposto, com vista à validação completa do método de auscultação de degradações da superfície de pavimentos.

No sexto e último capítulo são apresentadas as principais conclusões obtidas com o desenvolvimento do trabalho e aspetos a serem trabalhados no futuro.

2 Sistemas de Gestão de Pavimentos Aeroportuários

2.1 Enquadramento

Os aeroportos fazem parte integrante de um poderoso sistema de transporte de bens e pessoas, fazendo-se elemento crucial da economia e progresso das regiões, nações e municípios onde estão situados. À vista disso, faz-se necessário assegurar os subsídios necessários para o seu bom funcionamento (Haas R, et al., 1994) (Irfan, et al., 2015).

Uma componente importante para assegurar o bem-estar e segurança dos usuários destas infraestruturas é a rede de pavimentos utilizada pelas aeronaves. É necessário, portanto, que as instalações aeroportuárias apresentem algumas particularidades, como uma pista uniforme e com aderência adequada, de modo a garantir resistência estrutural e evitar derrapagens, para assegurar operações de pouso e decolagem. Problemas decorrentes de ações resultantes da sua utilização, ações relativas ao clima e de operacionalidade diária, geram disfunções nos pavimentos aeroportuários, alterando seu desempenho, qualidade e duração (AC 150/5380-6C, 2014). Devido a isso, passaram a ser aplicados sistemas de gestão de pavimentos aeroportuários (SGPA) com o propósito de assegurar o ciclo de vida para o qual foi projetado os pavimentos e sua utilização segura.

Os administradores de algumas instalações aeroportuárias ainda tomam decisões sobre a construção de pavimentos ou sua manutenção e reabilitação com base em necessidades instantâneas ou experiência, no lugar de adotarem um planejamento de longo prazo sustentado em dados sólidos e fiáveis. A adoção de sistemas de gestão de pavimentos permite a administração adequada dos pavimentos através da definição atempada, económica e eficaz das intervenções necessárias (Irfan, et al., 2015).

No caso dos aeroportos internacionais, em que se verificam movimentos significativos de aeronaves, os pavimentos aeroportuários ficam sujeitos a um processo de deterioração ainda mais rápido, que acaba por conduzir a altos níveis de degradação. Neste contexto, a adoção de ferramentas de apoio à decisão, como um SGPA, é crucial para auxiliar os administradores no processo de tomada de decisão sobre as soluções preventivas e rentáveis mais adequadas a considerar na execução de ações de manutenção e reabilitação (M&R) no tempo e local certo. Esses objetivos necessitam mais do que uma tendência de comportamento estrutural para justificar as intervenções no pavimento, uma vez que, comumente é uma degradação de carácter funcional que impulsiona uma ação mais rápida para manter um serviço de alto padrão (Carvalho, et al., 2017), o que reflete a importância de adotar um método de auscultação das degradações superficiais dos pavimentos eficaz e fiável, sendo a obtenção destes dados uma componente essencial do SGPA.

O recurso aos SGPA vem crescendo continuamente ao longo dos anos como forma de assegurar sistemas de pavimentos seguros, confortáveis e duradouros, que resultem em desempenhos fiáveis e eficazes garantindo níveis adequados de serviço e reduzindo gastos financeiros e humanos com manutenção e reabilitação dos pavimentos.

2.2 Pavimentos aeroportuários

Os pavimentos aeroportuários devem garantir características estruturais e funcionais adequadas, assegurando a degradação normal resultante das solicitações e fornecendo as condições de circulação necessárias à segurança e conforto dos seus usuários.

Os materiais que constituem as camadas, e por conseguinte, o pavimento, devem apresentar características adequadas de qualidade estrutural e funcional, a fim de resistirem às solicitações.

A qualidade funcional influencia no conforto e segurança das aeronaves e dos seus usuários, enquanto a qualidade estrutural está relacionada com a capacidade do pavimento de manter a sua estrutura sem expor defeitos significativos. O desempenho do pavimento está diretamente ligado à composição, compactação e propriedades físicas dos materiais constituintes das camadas (Fernandes, 2010).

Existem essencialmente dois tipos de pavimentos aeroportuários, os pavimentos rígidos e os flexíveis. Estes pavimentos reagem de maneira diferente às ações de operacionalidade diária (tráfego) e mudanças climáticas de acordo com os materiais utilizados na construção das diferentes camadas do pavimento. Devido isso, a maior diferença entre esses dois tipos de pavimentos é o modo de distribuição das cargas a que estão sujeitos (ver Figura 2.1). Os pavimentos rígidos suportam as cargas do tráfego através da sua elevada resistência à flexão, distribuindo as cargas que lhe são impostas sobre uma extensa área (b), enquanto os pavimentos flexíveis suportam as cargas do tráfego essencialmente através da fricção interna dos materiais que a compõem, distribuindo gradualmente as solicitações desde a superfície do pavimento até à fundação (a).

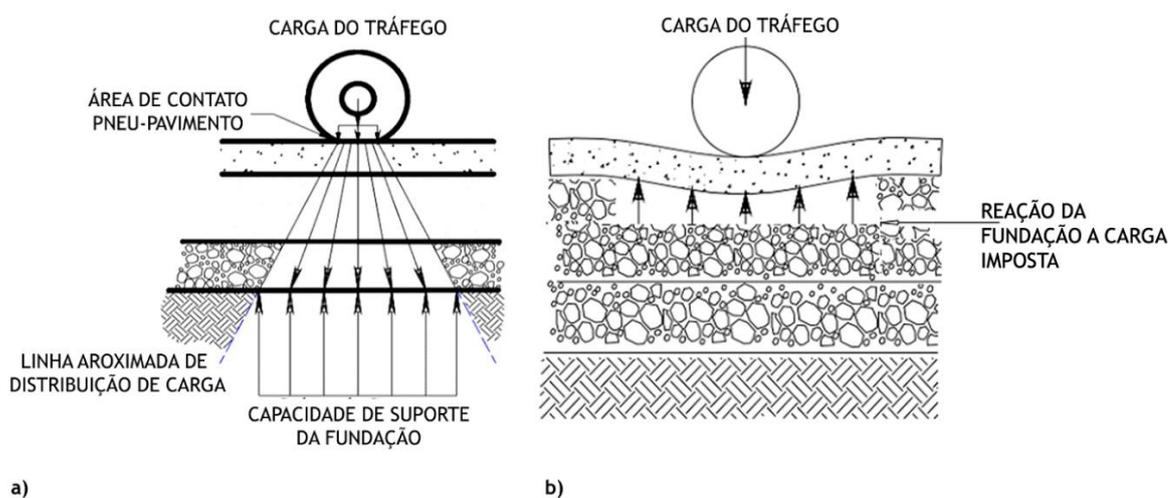


Figura 2.1 – a) Distribuição das cargas do tráfego no pavimento flexível; b) Distribuição das cargas do tráfego no pavimento rígido (adaptado de AC 150/5380-6C, 2014).

Os pavimentos rígidos são em geral constituídos por uma laje de betão de cimento *portland* (*Portland Cement Concrete* - PCC), uma camada de base e uma camada de sub-base, como apresentado na Figura 2.2. Este tipo de pavimento apresenta um elevado grau de rigidez e possui elevada resistência à flexão, responsável por suportar e distribuir as cargas que lhe são impostas sobre uma grande área de solo. São pavimentos resistentes ao derrame de óleos, combustíveis e lubrificantes, sendo por este motivo muito utilizados nas placas de estacionamento das aeronaves (Fernandes, 2010) (AC 150/5380-6C, 2014) (Domingos, 2017).

Estes pavimentos possuem como elemento estrutural principal a laje de betão de cimento, armada ou não armada, responsável por receber as solicitações das aeronaves e as distribuir por uma extensa área de solo sem causar deformações excessivas nestes, bem como, por fornecer uma superfície antiderrapante e impedir a infiltração em excesso de água da superfície na camada de sub-base. Esta camada assenta numa camada de base e sub-base granular compactada ou tratada, suportada por sua vez pela fundação. A laje é separada por juntas, seladas com materiais elásticos, em decorrência da expansão/retração do PCC, dos materiais utilizados e das restrições dos processos construtivos (AC 150/5380-6C, 2014).

A camada de base proporciona suporte estável e uniforme para a laje do pavimento. Esta camada proporciona uma drenagem subterrânea, controla a ação do gelo-degelo e a dilatação do solo de fundação, propicia uma plataforma de construção estável e impossibilita a subida de materiais finos à superfície. Os pavimentos rígidos normalmente exigem uma espessura mínima da camada de base de 100 mm. Os pavimentos concebidos para suportar aeronaves com peso igual ou superior a 45 000 kg devem ter uma base estabilizada (AC 150/5380-6C, 2014).

A camada de sub-base é utilizada em pavimentos rígidos construídos em áreas onde há elevada ação do gelo-degelo e/ou o solo de fundação é fraco. Sua funcionalidade é semelhante à da camada

de base, diferindo nos materiais, que não precisam ser tão rigorosos devido esta camada estar submetida a cargas menores. A sub-base é constituída por material granular estabilizado ou devidamente compactado (AC 150/5380-6C, 2014).

O solo de fundação é a camada de solo que figura a fundação da secção do pavimento. Este recebe apenas uma pequena parcela das ações verticais de contato pneu-pavimento, devido à dissipação de cargas ao longo das camadas do pavimento. As cargas que chegam até o solo de fundação devem ser pequenas o suficiente para não causar deformações e deslocamentos excessivos do mesmo (AC 150/5380-6C, 2014).

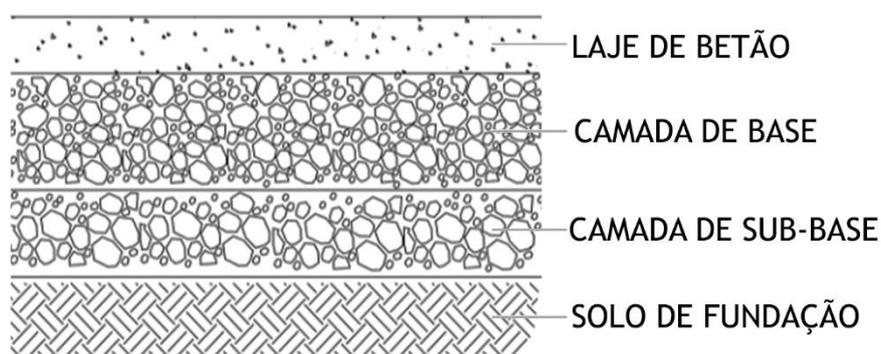


Figura 2.2 – Estrutura típica de um pavimento rígido (adaptado de AC 150/5380-6C, 2014).

No que diz respeito aos pavimentos flexíveis, a fricção interna dos materiais que o constituem garantem resistência às cargas que lhe são impostas, portanto, depende substancialmente da granulometria e forma dos agregados, da densidade das misturas betuminosas e da quantidade de betume integrado. Esse tipo de pavimento é constituído por uma camada de desgaste, uma camada de base, uma camada de sub-base e pelo solo de fundação, como apresentado na Figura 2.3. As camadas são compostas por materiais betuminosos ou granulares estritamente selecionados, projetadas para dissipar e propagar as solicitações da superfície até a fundação, de modo que não ultrapassem a capacidade de carga de nenhuma camada (Fernandes, 2010) (AC 150/5380-6C, 2014).

Os pavimentos flexíveis possuem boas características de aderência, regularidade e conforto para os usuários, sendo normalmente utilizados nas pistas e caminhos de circulação.

A camada de desgaste é formada por uma mistura de agregados selecionados, ligados entre si por um ligante betuminoso. Esta deve suportar todas as solicitações exteriores impostas pelo clima e tráfego, e proporcionar a aderência necessária para manter a ligação entre os pneus das aeronaves e o pavimento sem causar desgaste indevido nestes. Responsável por prevenir que a água da superfície infiltre na camada de base e garantir uma circulação suave, livre de partículas desagregadas provenientes da superfície do pavimento que possam colocar em risco a segurança dos usuários e das aeronaves. Esta camada é a que mais está sujeita a degradações, não apenas

pelas solicitações impostas diretamente a sua superfície, mas também por evidenciar disfunções das camadas inferiores (AC 150/5380-6C, 2014).

Os pavimentos flexíveis possuem a camada de base como principal elemento estrutural, responsável por receber os esforços verticais a que está sujeita e distribuí-los gradativamente até ao solo de fundação, de modo que as solicitações impostas não ultrapassem a capacidade de carga das camadas subjacentes. A resistência e qualidade desta camada depende da sua composição, compactação e propriedades físicas dos materiais constituintes. A camada de base deve apresentar qualidade e espessura suficientes para evitar falhas na sub-base e/ou leito do pavimento (caso exista), suportar as tensões produzidas na própria camada, resistir a pressões verticais que tendem a gerar consolidação, ocasionando distorção da camada superficial do pavimento flexível e resistir às alterações de volume resultantes da variação no seu teor de humidade. A sua constituição resulta de agregados selecionados, rígidos e duráveis, que geralmente se enquadram em duas classes principais: estabilizadas e granulares. As bases estabilizadas geralmente são constituídas por agregados triturados ou não triturados ligados a um estabilizador, como o cimento *portland* ou o betume (AC 150/5380-6C, 2014).

A camada sub-base é utilizada em zonas onde a ação da água é severa ou onde o solo de fundação é fraco. Possui funcionalidade semelhante à camada de base, porém não necessita de uma seleção de materiais tão rigorosa, visto que as cargas impostas a esta camada são menores. Desempenha sobretudo funções de drenagem embora também tenha características resistentes. Esta camada é constituída por material granular estabilizado ou devidamente compactado, com boas características drenantes (AC 150/5380-6C, 2014).

O solo de fundação é composto pelo terreno natural e está sujeito a cargas menores do que a superfície, a base ou a sub-base do pavimento. As camadas superiores devem dissipar as solicitações impostas pelo tráfego a valores inferiores o suficiente para não causar deformações e deslocamentos excessivos no solo de fundação. Quando o solo de fundação não apresenta capacidade de suporte suficiente para receber estas solicitações, é comum considerar a adição de uma camada de solo com propriedades melhores, nomeada de leito do pavimento (AC 150/5380-6C, 2014).

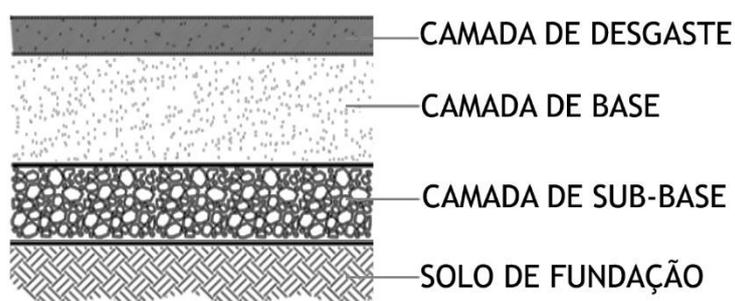


Figura 2.3 - Estrutura típica de um pavimento flexível (adaptado de AC 150/5380-6C, 2014).

O pavimento, quer seja rígido ou flexível, deve estar sujeito a avaliações constantes e manutenções e reabilitações periódicas de forma a garantir níveis de desempenho e de qualidade de serviço adequados ao longo da sua vida útil. Estes aspetos acentuam a necessidade da adoção de um sistema de gestão que estruture todas as atividades a serem executadas nos pavimentos aeroportuários da forma mais eficaz possível (Fernandes, 2010) (Domingos, 2017) (Lima, 2016).

2.3 Sistemas de Gestão de Pavimentos Aeroportuários

A manutenção do estado de qualidade dos pavimentos aeroportuários é essencial para a prestação de um serviço adequado de transporte de bens e pessoas, influenciando as atividades económicas dos territórios. Devido isso, estas infraestruturas exigem grandes investimentos dos recursos públicos para sua construção e manutenção ao longo do seu tempo de vida útil. O aumento progressivo do tráfego aéreo, sujeitando os pavimentos das infraestruturas aeroportuárias a mais cargas do que no passado, afeta o comportamento da sua estrutura que progressivamente se aproxima ou ultrapassa sua vida útil. Consequentemente, após a construção dos pavimentos, verifica-se uma maior ênfase na manutenção dos mesmos. Quanto mais antiga a rede de pavimentos mais difícil se torna a sua gestão e maiores são, em geral, os valores orçamentados, devido o comportamento complexo do mesmo (Irfan, et al., 2015).

Um pavimento aeroportuário geralmente funciona bem durante a maior parte da sua vida útil, perdendo sua qualidade paulatinamente ao longo do tempo. Devido a isso, as entidades gestoras implementam Sistemas de Gestão de Pavimentos Aeroportuários com o objetivo de prolongar o tempo de vida útil, de forma a garantir a qualidade e a utilização efetiva e segura do pavimento (Fernandes, 2010) (AC 150/5380-7B, 2014) (FAA, 2014) (Irfan, et al., 2015) (Lima, et al., 2017) (Domingos, et al., 2017).

Um SGPA é um procedimento sistemático, objetivo e consistente que auxilia os prestadores de serviço na tomada de decisões, aprimora e cria planos estratégicos de manutenção, reabilitação e previsão de operações, a fim da maximização de benefícios e minimização de custos (AC 150/5380-7B, 2014) (FAA, 2014) (Lima, et al., 2017) (Domingos, et al., 2017).

O sistema oferece um conjunto de ferramentas que permitem produzir e quantificar dados sobre a rede de pavimentos, avaliar seu estado atual e prever a evolução do seu estado futuro, armazenando todas as informações sobre o desempenho do pavimento numa base de dados, visando auxiliar o desenvolvimento de métodos de M&R que respeitem os recursos disponíveis (económicos e humanos). O sistema permite ainda a realização de uma análise da repercussão de várias situações de orçamento, assegurando um projeto económico e eficiente (U. S. Army Corps of Engineer, 2014) (Irfan, et al., 2015).

A aplicação deste conjunto de ferramentas tem como resultado uma avaliação que alerta o gestor de pavimentos sobre as situações críticas que justificam a intervenção nos pavimentos (manutenção preventiva ou reabilitação) ao longo do seu ciclo de vida.

A Figura 2.4 mostra, ao longo do tempo, como ocorre a deterioração do pavimento e o custo associado à sua manutenção. O custo é inversamente proporcional à qualidade do pavimento, visto que, quanto mais deteriorado o pavimento se encontrar, maior a despesa de M&R necessária para repor a qualidade do mesmo. É possível observar pelo gráfico que o melhor momento de intervenção no pavimento é quando se verifica uma diminuição acentuada no desempenho, isto é, quando se verifica aumento significativo da taxa de deterioração do pavimento (AC 150/5380-6C, 2014) (Irfan, et al., 2015).

Como pode ser observado na Figura 2.4, o custo de reparação pode ser consideravelmente menor se a manutenção for realizada durante as fases iniciais de deterioração, antes de o pavimento atingir o nível mínimo de operacionalidade, isto é, necessite de reconstrução completa. O nível mínimo de operacionalidade é o nível de desempenho mínimo abaixo do qual o pavimento é considerado inaceitável para a sua função designada. Estes são frequentemente baseados em padrões de desempenho definidos pelos administradores da infraestrutura, indicadores do estado do pavimento e nas expectativas dos usuários (Irfan, et al., 2015).

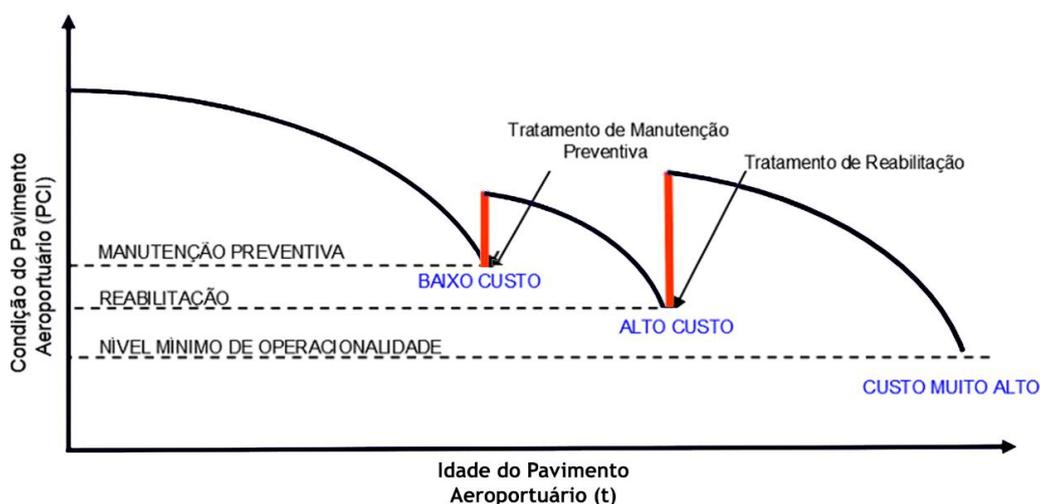


Figura 2.4 - Evolução do estado do pavimento aeroportuário ao longo do seu ciclo de vida (adaptado de Irfan, et al., 2015).

Em suma, um SGPA ajuda os tomadores de decisão a encontrar estratégias de manutenção e reabilitação para manter os pavimentos das infraestruturas aeroportuárias em condições de funcionamento durante um período especificado, da forma mais eficaz e rentável possível (Lima, 2016) (FAA, 2014) (Irfan, et al., 2015).

Dependendo da finalidade dos administradores das infraestruturas aeroportuárias, os SGPAs podem assumir várias funções, no entanto, todos apresentam em comum um conjunto de componentes necessárias à sua operação. Estas componentes são o inventário da rede de pavimentos, a avaliação do estado do pavimento, a base de dados, a análise de dados, no qual são definidos o plano e programa de estratégias de manutenção e, por fim, os resultados do sistema.

2.4 Estrutura de um SGPA

A gestão de pavimentos fornece informação para a tomada de decisões a dois níveis distintos: gestão ao nível da rede e gestão ao nível de projeto.

A gestão do pavimento ao nível da rede envolve a avaliação do estado de todos os pavimentos pertencentes à rede, com o objetivo de identificar as necessidades e prioridades atuais e futuras de manutenção e reabilitação para o desenvolvimento de planos orçamentais a curto e longo prazo. Para este nível de gestão, somente a inspeção visual das unidades de amostra representativas da rede de pavimentos são suficientes para efetuar a avaliação, posto que não são desenvolvidos projetos específicos. Após a recolha dos dados, os pavimentos que necessitam de intervenção são identificados para M&R necessárias (Applied, 2013).

A gestão ao nível de projeto procura a solução mais apropriada da perspetiva técnico-económica, para cada zona da rede que necessite de intervenção. Esse nível deve passar por uma avaliação rigorosa das causas de deterioração, sujeita a ensaios, como por exemplo, ensaios destrutivos (sondagens à rotação, cone de penetração dinâmico) e não destrutivos (viga de Benkelman, ensaio de carga em placa, defletómetro de impacto – FWD), de maneira a definir com precisão o projeto final. Além disso, deve determinar as possíveis soluções dos problemas encontrados no pavimento, assim como as estratégias de conservação tendo em conta as limitações orçamentais, e por fim, desenvolver o projeto final de manutenção e reabilitação para as áreas identificadas (Applied, 2013).

A Figura 2.5 apresenta os principais componentes considerados na implementação de um SGPA orientado a operar ao nível da rede ou do projeto (Applied, 2013) (Lima, et al., 2017) (W.DOT, 2019).

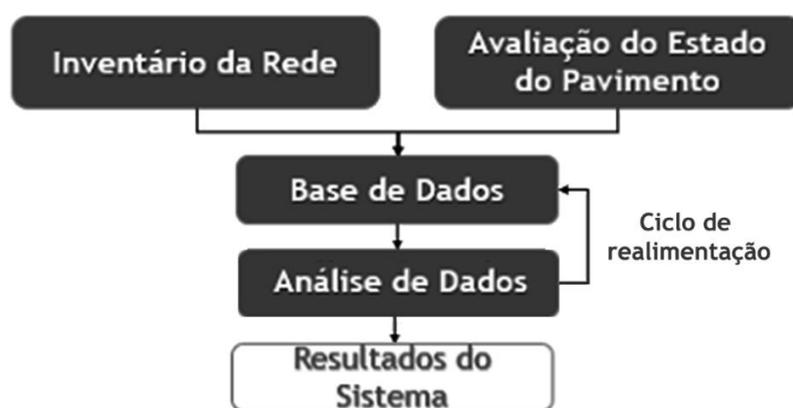


Figura 2.5 - Componentes de um Sistema de Gestão de Pavimentos Aeroportuários (adaptado de Lima, et al., 2017).

Para compreender melhor cada fase do sistema, a descrição de cada componente é apresentada tendo por base os documentos *Implementation of an Airport Pavement Management System* (TRB, 2008), a Dissertação “Sistemas de Gestão de Pavimentos Aeroportuários” (Fernandes,

2010), o *Washington Airport Pavement Management Manual* (W.DOT, 2019), o *Airport Pavement Management Program* (AC 150/5380-7B, 2014) e a Dissertação “Sistemas de Gestão de Pavimentos Aeroportuários para Cabo verde” (Lima, 2016).

2.4.1 Inventário da rede

A implementação de um Sistema de Gestão de Pavimentos Aeroportuários deve iniciar pelo inventário da rede de pavimentos e o levantamento do estado dos mesmos. O desenvolvimento destas atividades permite obter dados sobre a estrutura e o estado dos pavimentos do aeroporto. A informação recolhida é armazenada de forma organizada e informatizada numa base de dados, de modo a facilitar o acesso à informação, a análise do estado da rede de pavimentos e o desenvolvimento de previsões e estratégias de manutenção e reabilitação.

O inventário da rede é realizado para obter as características físicas dos pavimentos geridos. Normalmente, as informações recolhidas incluem dados de construção, manutenção, tráfego e estado do pavimento. É importante ter em mente duas orientações ao determinar a extensão da informação histórica a incluir no inventário. Em primeiro lugar, os dados devem estar acessíveis para que não se invista muito tempo na pesquisa de registos de construção e em segundo lugar, a informação recolhida deve ter um propósito.

O levantamento das degradações presentes nos pavimentos pode ser feito por recurso a vários métodos de recolha de dados, os quais fornecem as informações necessárias para a avaliação do estado dos pavimentos. Estes métodos têm evoluído ao longo do tempo, passando do levantamento tradicional realizado a pé, onde o tipo, o nível de gravidade e a área da degradação são identificadas e registadas em papel ou num dispositivo que permita o registo digital da informação, no campo, para levantamentos utilizando veículos equipados multifunções ou o uso de veículos aéreos não tripulados (UAVs - drones).

De forma a obter resultados fiáveis na avaliação dos pavimentos, seja ela estrutural ou funcional, são disponibilizados documentos de referência com exemplos ilustrativos, descrição e forma de medição das degradações, os catálogos de degradações (U.S. Army Corps of Engineers, 2009) (U.S. Army Corps of Engineer, 2009) (ASTM D5340-12, 2012) (FAA, 2014), que devem ser utilizados pelos técnicos responsáveis pela inspeção, quer estes façam o registo das degradações observando o pavimento *in situ* ou com recurso a sistema de fotografia e/ou vídeo.

Para um bom funcionamento do SGPA é essencial que a informação inicial, obtida através do inventário da rede de pavimentos e levantamento do estado dos pavimentos, possua qualidade. A informação recolhida deve ser inserida de forma organizada na base de dados. Após esse processo pode ser efetuada a avaliação da qualidade dos pavimentos. Consequentemente, o desenvolvimento de ações fundamentais para garantir que o pavimento apresente qualidade operacional aceitável ao longo do tempo.

2.4.2 Avaliação do estado do pavimento

As decisões a serem tomadas pelo gestor dos pavimentos dependem substancialmente da componente de avaliação do estado do pavimento. Por essa razão, é fundamental selecionar um procedimento eficaz para que os resultados do SGPA sejam confiáveis.

A avaliação dos pavimentos surge paralelo à necessidade de conhecer o estado dos pavimentos em um dado instante, de modo a verificar se o mesmo está desempenhando os requisitos mínimos de segurança e conforto aos usuários. Esta componente deve estabelecer não só o estado em que se encontra o pavimento, como também dar indicações sobre o seu desempenho, as necessidades de intervenção atuais e futuras e o tempo de vida útil que lhe resta (Domingos, 2017). O desenvolvimento desses processos envolvem o acompanhamento do pavimento ao longo do tempo de forma a determinar a periodicidade da ocorrência das degradações na superfície do pavimento e estabelecer propriedades estruturais e funcionais do mesmo (Fernandes, 2010).

A forma de avaliação do estado de conservação da rede de pavimentos depende fundamentalmente da finalidade do sistema de gestão, se este pretende avaliar os pavimentos ao nível de projeto ou da rede. Isto significa que a análise pode ser mais detalhada, recorrendo a ensaios destrutivos ou não destrutivos, de modo a compreender o funcionamento estrutural do pavimento, ou efetuada com recurso a um diagnóstico visual do estado da rede de pavimentos (degradações identificadas na superfície do pavimento).

O método de avaliação mais utilizado ao nível da rede baseia-se na determinação do *Pavement Condition Index* (PCI) (ASTM D5340-12, 2012). Este índice numérico, estipulado a partir do tipo, nível de gravidade e densidade das degradações observadas à superfície dos pavimentos, exprime as condições estruturais e funcionais do pavimento e permite definir estratégias de intervenção a partir da sua interpretação. Ainda é possível traçar metas quanto às necessidades de conservação e reabilitação dos pavimentos, assim como do desempenho que estas atividades vão proporcionar em serviço (Lima, 2016).

O método recomendado pela Organização Internacional de Aviação Civil (*International Civil Aviation Organization* – ICAO) ao nível de projeto baseia-se na determinação do *Aircraft Classification Number / Pavement Classification Number* – ACN/PCN (ICAO, 2013). Este método traduz o efeito de uma única aeronave para diferentes tipos de pavimentos e é determinado através de um número que varia de acordo com o peso, tipo de aeronave, categoria do solo de fundação, tipo de pavimento e forma do trem de aterragem das aeronaves, e é disponibilizado pelos fabricantes das aeronaves. A componente PCN expressa a capacidade de suporte do pavimento, isto é, determina o tipo de aeronave que possui livre acesso ao pavimento, com a condição do ACN ser inferior ao PCN (Lima, 2016).

O armazenamento dos dados relativos a esta componente possibilitará desenvolver diferentes estratégias de conservação e modelos de previsão de intervenções futuras, aptos ao pavimento em estudo, tendo em vista uma manutenção preventiva e adequada.

As secções seguintes apresentam as operações necessárias para garantir uma adequada avaliação da qualidade dos pavimentos aeroportuários, nomeadamente a identificação da “Rede de pavimentos aeroportuários”, a “Determinação do número mínimo de unidades de amostra a observar”, e a determinação do “*Pavement Condition Index – PCI*”.

2.4.2.1 Rede de pavimentos aeroportuários

Uma rede de pavimentos aeroportuários é constituída por todos os pavimentos existentes na infraestrutura aeroportuária ou todos os pavimentos do “Lado Ar” que fazem parte do sistema de aviação do país. O “Lado Ar” refere-se ao conjunto formado pela área operacional de um aeródromo, terrenos e edificações adjacentes, ou parte delas, onde o acesso é controlado (AC 150/5380-7B, 2014). Para avaliar o estado do pavimento é necessário inicialmente identificar e categorizar os diferentes tipos de pavimentos que existem numa determinada infraestrutura aeroportuária de acordo com o tipo de função que cada um desempenha, e ainda subdividir estes em áreas menores (amostras) que permitam aplicar uma abordagem de avaliação por amostragem. Logo, a rede de pavimentos é dividida inicialmente em elementos designados por ramos (placas de estacionamento, pistas de pouso e decolagem, pistas de rolagem e caminhos de circulação), que se dividem em secções com características semelhantes baseadas no tráfego, no estado do pavimento, na estrutura do pavimento, no tipo de material e no histórico de construção e manutenção. Seguido disso, cada uma das secções é subdividida em áreas de estudo normalizadas (unidades de amostra) (ASTM D5340-12, 2012).

De acordo com a norma ASTM (ASTM D5340-12, 2012), a dimensão padrão das unidades de amostras para pavimentos flexíveis é de 450 m². Caso a área do pavimento não seja divisível por este valor, ou caso seja necessário ajustar a divisão às condições locais, a área pode variar até ± 180 m². Para pavimentos rígidos o tamanho ideal de uma amostra é de 20 placas vizinhas, com variação de ± 8 e, caso o espaçamento entre estas for superior a 8 metros, deve assumir juntas imaginárias espaçadas a distância superior ou igual a 8 metros.

2.4.2.2 Determinação do número mínimo de unidades de amostra a observar

A norma ASTM D5340-12 (2012) estabelece uma metodologia para determinar o número de unidades de amostra mínimas a serem inspecionadas e avaliadas. A quantidade de unidades de amostra necessárias para que o estudo seja estatisticamente significativo (desde que esse número não seja inferior a 5, sendo neste caso inspecionadas todas as unidades de amostra). A quantidade pode variar de um número total (N) a um número mínimo de unidades de amostra (n) calculado para que represente um nível de confiança de 95% ao determinar o PCI da respetiva secção. Os restantes 5% correspondem ao erro admissível (e) que equivale à diferença máxima entre o PCI real e o PCI estimado (± 5 pontos PCI).

O valor de n é determinado de acordo com a Expressão 2.1.

$$n = \frac{N \times s^2}{\left(\left(\frac{e^2}{4}\right)(N - 1) + s^2\right)} \quad (\text{Exp. 2.1})$$

Na qual:

N – Número total de unidades de amostra da secção.

s – Desvio padrão do PCI de uma unidade de amostra para outra dentro da mesma secção. A inspeção inicia admitindo a seguinte hipótese: desvio padrão de 15 pontos para os pavimentos rígidos (PCC) e de 10 pontos para os pavimentos flexíveis (AC). Nas próximas inspeções o desvio padrão da observação anterior deve ser utilizado no cálculo do valor de n .

e – Erro máximo admitido na estimativa do PCI da secção.

2.4.2.3 Pavement Condition Index – PCI

O *Pavement Condition Index* é um indicador numérico utilizado para quantificar o estado dos pavimentos determinado pela norma ASTM D5340-12 “*Standard Test Method for Airport Pavement Condition Index Surveys*” (ASTM D5340-12, 2012). O índice PCI para pavimentos aeroportuários foi desenvolvido pelo *US Army Corps of Engineers* e financiado pela *U.S. Air Force* (AC 150/5380-7B, 2014).

Este índice descreve a integridade estrutural e as condições operacionais dos pavimentos e sua determinação para pavimentos flexíveis é baseada na identificação e avaliação do nível de gravidade de 17 degradações observadas na superfície dos pavimentos (ASTM D5340-12, 2012). O valor do PCI varia de 0 (pior condição) a 100 (melhor condição) e sua escala de classificação pode ser utilizada para avaliar a necessidade de atividades de manutenção e reabilitação (AC 150/5380-7B, 2014) (Domingos, 2017) (Di Mascio, et al., 2019).

A avaliação do estado do pavimento se dá especificamente, após o cálculo do índice PCI das secções do pavimento, pela comparação dos seus valores com os valores fornecidos em intervalos de uma escala de classificação do PCI (ver Figura 2.6).



Figura 2.6 - Escala de classificação do PCI (adaptado de AC 150/5380-7B, 2014).

A escala de classificação da qualidade do pavimento, traduzida pelo índice PCI, apresenta informações relativas ao estado do pavimento e ao tipo de intervenção a considerar (Barros , 2008) (AC 150/5380-7B, 2014):

- Bom (85-100): refere-se a um pavimento novo, com nenhum ou poucos defeitos de baixa gravidade. Traduz uma intervenção apenas de manutenção corrente.
- Satisfatório (70-85): refere-se a um pavimento que detém apenas alguns defeitos de gravidade baixa. Necessita apenas de uma manutenção preventiva.
- Razoável (55-70): refere-se a um pavimento que apresenta degradações de níveis de gravidade baixo e médio. Requer uma manutenção a curto prazo de caráter preventivo ou reconstitutivo.
- Mau (40-55): refere-se a um pavimento que possui degradações em todos os de níveis de gravidade (baixo, médio e alto), podendo ocasionar sérios problemas operacionais. Traduz uma manutenção a curto prazo de fim reconstitutivo.
- Muito mau (25-40): refere-se a um pavimento que detém degradações de níveis de gravidade médio e alto, ocasionando restrições operacionais. Necessita de reabilitação a curto prazo.
- Seriamente danificado (10-25): refere-se a um pavimento que apresenta degradações de nível de gravidade alto, que causam problemas consideráveis de operacionalidade. É necessário recorrer à reconstrução urgente do pavimento.
- Falha estrutural (0-10): refere-se a um pavimento que apresenta degradações muito avançadas, que impedem a operação das aeronaves com segurança. Necessita de reconstrução imediata e profunda do pavimento.

2.4.3 Base de dados

Dentre as componentes do sistema, destaca-se a base de dados. Esta é a componente central do SGPA, responsável pela eficiência do sistema. Tem como objetivo armazenar, de forma informatizada e organizada, todas as informações referentes ao estado e à infraestrutura da rede de pavimentos ao longo da sua vida útil. Este módulo armazena toda a informação produzida nos

diversos módulos do sistema e permite interrelacioná-las e tratá-las de acordo com os objetivos dos utilizadores (administradores).

Para interrelacionar as informações produzidas nas várias componentes em relação a um domínio é necessário que os dados sejam organizados a níveis distintos, que sejam pertencentes a um sistema de referência comum, e que sejam exclusivos, consistentes, fiáveis, objetivos e úteis a diferentes aplicações, eventualmente independentes, e ainda que permitam sua atualização e desenvolvimento contínuos.

Através de um sistema de procura e inquirição de dados e informações de entrada, a base de dados permite disponibilizar aos utilizadores relatórios, gráficos, cartas cartográficas, mapas temáticos, orçamentos e quadros específicos.

A base de dados deve fornecer informações atualizadas sobre a rede de pavimentos que apoiem os utilizadores nos vários processos do SGPA, nomeadamente na planificação e programação, projeto, investigação, construção e manutenção dos pavimentos.

Embora um sistema de arquivamento manual possa ser possível para uma pequena rede, a eficiência e custo-eficácia do armazenamento de dados em um computador faz da base de dados automatizada a alternativa mais prática, especialmente quando um SGPA abrangente é desejado.

2.4.4 Análise de dados – plano e programa de estratégias de manutenção

A análise dos dados pode ocorrer ao nível da rede ou ao nível do projeto. A nível da rede, as potenciais necessidades de reabilitação de toda a rede são avaliadas e priorizadas para planeamento e agendamento das necessidades orçamentais ao longo de um período de vários anos. Este processo garante que os administradores usem os recursos disponíveis para manutenção e reabilitação da melhor forma possível. Após as decisões de planeamento e programação terem sido tomadas durante a análise ao nível da rede, a informação na base de dados pode ser utilizada para complementar uma análise ao nível do projeto, especialmente em locais mais sensíveis da rede. Neste caso, cada projeto é investigado em pormenor para determinar o tratamento de reabilitação adequado.

A principal finalidade desta componente é a de utilizar as informações da base de dados em análises que sejam capazes de diagnosticar o estado e desempenho do pavimento, de modo a encontrar problemas, detectar as necessidades de conservação atuais e futuras e prever os efeitos das aplicações de estratégias de manutenção e reabilitação ao longo da sua vida útil.

Nos pontos seguintes são apresentados aspetos particulares do desenvolvimento de modelos de previsão da evolução do estado do pavimento, determinação das prioridades de conservação e análise económica de estratégias de conservação dos pavimentos.

2.4.4.1 Desenvolvimento de modelos de previsão da evolução do estado do pavimento

O desenvolvimento de modelos de previsão da evolução do comportamento dos pavimentos constitui uma das partes mais complexas de um SGPA, visto que todas as componentes seguintes, como a definição de estratégias e planos de conservação, dependem da fiabilidade destes modelos. O método mais adequado depende sobretudo da quantidade de informação disponível e do tipo de *software* escolhido a para gestão dos pavimentos (Fernandes, 2010).

Os modelos de previsão permitem prever quando o pavimento atingirá estados de degradação elevados e assim, tomar decisões preventivas ao nível de manutenção da rede de pavimentos. O mecanismo mais utilizado para sua determinação é a modelação com recurso a famílias de curvas de desempenho, fundamentada na possibilidade de que pavimentos aeroportuários de características semelhantes, quando sujeitos a condições semelhantes, reagem da mesma maneira; a modelação especializada, aplicada quando não há nenhum registo sobre o pavimento, baseando-se na opinião de peritos profissionais da área dos pavimentos; a modelação através de modelos de probabilidade de Markov (cadeia de Markov), usualmente utilizados em pavimentos rodoviários; e a extrapolação de tendências existentes, utilizados quando existe histórico sobre o estado do pavimento, podendo ser feita a extrapolação por meio de famílias de curvas de desempenho (TRB, 2011) (Domingos, 2017).

Os modelos de previsão produzem cenários futuros do comportamento do pavimento que devem ser analisados e avaliados para determinação do seu estado e qualidade. Após isso, são definidos vários planos previsionais de conservação dos pavimentos, que novamente passam por uma análise que alia prioridades, qualidade de serviço e economia, definindo desta forma a estratégia de manutenção mais eficiente.

2.4.4.2 Determinação das prioridades de conservação do pavimento

Os planeamentos estratégicos são baseados nos custos de conservação e reabilitação dos pavimentos e nos recursos disponíveis (económicos e humanos) que geralmente são insuficientes para resolução de todos os problemas da rede. Devido isso, é essencial priorizar as secções ou ramos que precisam de tratamento, de forma a se enquadrar no orçamento disponível e garantir qualidade operacional.

A priorização da conservação dos pavimentos pode se dar ao nível da rede e/ou ao nível de projeto.

A determinação das prioridades ao nível da rede é efetuada considerando apenas alguns fatores como o tipo de tráfego a que os pavimentos do complexo aeroportuário estão sujeitos e o estado de conservação estrutural e funcional deles, geralmente este último fator é o único utilizado (Lima, 2016).

Ao nível de projeto, a priorização é efetuada considerando todos os fatores técnicos e económicos a curto, médio e longo prazo com recurso a modelos de comportamento existentes nos sistemas

de gestão. Estes modelos permitem simular os efeitos de diferentes estratégias de manutenção sobre o pavimento (Lima, 2016).

2.4.4.3 Análise económica de estratégias de conservação dos pavimentos

As estratégias de conservação dos pavimentos dependem fundamentalmente da finalidade do SGPA, portanto, é necessário desenvolver modelos de previsão do desempenho do pavimento, definir prioridades de conservação do pavimento, e fazer a avaliação económica das estratégias de manutenção definidas para o mesmo.

A análise económica das estratégias possíveis de conservação dos pavimentos tem como objetivo auxiliar mais eficiente o administrador, de modo a garantir a qualidade dos pavimentos ao longo da sua vida útil, de forma mais económica.

Qualquer fator que influencie a evolução do estado do pavimento ou a relação custo-benefício das ações de intervenção consideradas deve ser avaliado de modo a serem consideradas as atividades com o menor custo possível. Para o efeito, uma análise de vários cenários de M&R do pavimento, compreendendo os momentos e todas as possibilidades de intervenção possíveis para resolução dos problemas identificados no pavimento, incluindo intervenções correlacionadas e a não aplicação de nenhuma intervenção, deve ser considerada, o que permite analisar os efeitos e gastos de cada solução no sistema.

A escolha da estratégia mais adequada deve, entre as analisadas economicamente, ser aquela que otimiza o investimento a aplicar, paralelo aos critérios exigidos.

Sendo assim, o sistema permite administrar os recursos, determinar o nível de financiamento mais produtivo e planificar intervenções na rede em função da disponibilidade de recursos. Além de definir o efeito do adiamento dos trabalhos de conservação sobre os custos da administração e assegurar a rentabilidade dos recursos disponíveis. Isto ocorre através de um sistema de prioridades baseado na comparação de custos e benefícios emergentes das diferentes alternativas possíveis.

2.4.5 Resultados do sistema

Os resultados das análises do sistema só são úteis se as informações fornecidas puderem ser facilmente transmitidas. Existem vários métodos que permitem apresentar de forma adequada os resultados das análises discutidas nas secções anteriores, recorrendo a tabelas, relatórios, gráficos e mapas. Em geral, os engenheiros preferem ver informações detalhadas sob a forma de relatórios abrangentes. No entanto, devido ao volume de informações contidas nestes tipos de relatórios, podem não ser eficazes para transmitir rapidamente informações aos administradores dos aeroportos. Neste caso, os relatórios gráficos são mais eficazes para as pessoas que precisam avaliar rapidamente grandes quantidades de dados.

2.4.6 Ciclo de realimentação

Um componente frequentemente esquecido de um SGPA é o desenvolvimento do ciclo de realimentação. O ciclo de realimentação estabelece um processo pelo qual o desempenho real e os dados de custo são introduzidos de volta nos modelos utilizados na análise de gestão de pavimentos. As informações introduzidas ao longo da vida útil do pavimento devem ser utilizadas para atualizar os modelos utilizados na gestão do pavimento, de modo que os resultados do sistema se mantenham fiáveis e melhorem com o tempo (W.DOT, 2019).

3 Auscultação de Dados em Pavimentos Aeroportuários

Se na etapa de dimensionamento de um pavimento os danos previstos, causados pelas ações externas (de origem humana ou natural), devem ser levados em conta e sistematicamente aferidos e avaliados, com a obra já finalizada e o pavimento em uso, toma especial importância a medição de degradações e a avaliação do estado estrutural e funcional do pavimento.

Para retirar o maior partido da informação recolhida sobre o estado dos pavimentos, é necessário construir bases de dados sólidas que suportem o desenvolvimento das estratégias necessárias para o tratamento dos danos presentes nas estruturas dos pavimentos. Como referido anteriormente, os Sistemas de Gestão de Pavimentos Aeroportuários (SGPA) constituem a ferramenta que sistematiza estas operações, sendo considerada a “Base de Dados” como a componente central do sistema, responsável pela qualidade e sucesso das soluções de intervenção encontradas.

Esta componente garante o armazenamento de toda informação referente às características da rede de pavimentos e ao seu estado de conservação ao longo da sua vida útil, disponibilizando estes dados de maneira estruturada para a realização das análises previstas nas várias componentes do sistema. Deste modo, a eficiência do SGPA depende substancialmente da qualidade e quantidade dos dados relativos à estrutura e ao estado dos pavimentos aeroportuários, sendo essenciais à implementação da componente “Avaliação do Estado do Pavimento”, que por sua vez define o sucesso da componente “Plano e Programa de Estratégias de Manutenção”.

A qualidade dos dados coletados é, portanto, indispensável para identificar deficiências e diagnosticar adequadamente o estado do pavimento, a fim de detectar as necessidades de manutenção atuais e futuras, prevendo os efeitos das estratégias de intervenção sobre os pavimentos ao longo da vida útil.

As primeiras informações inseridas na base de dados do SGPA são provenientes do inventário e levantamento do estado do pavimento. No inventário são recolhidos todos os dados existentes sobre a rede de pavimentos, como os dados sobre sua localização, suas características, tráfego, histórico de construção e conservação e custos associados. No levantamento do estado do pavimento são recolhidos dados sobre as degradações superficiais dos pavimentos, mediante a realização da inspeção visual *in situ* ou através da visualização de imagens recolhidas por veículos multifuncionais que capturam a superfície do pavimento.

No entanto, a inspeção visual das degradações superficiais dos pavimentos aeroportuários está se tornando cada vez mais desafiadora para as equipas de manutenção, devido às restrições operacionais que limitam o tempo de acesso aos pavimentos com tráfego significativo e às reduções no financiamento e nos recursos humanos disponíveis para a realização da inspeção visual dos pavimentos (Keegan, et al., 2014). Além disso, a observação do estado da superfície do

pavimento é de difícil averiguação devido à subjetividade do julgamento humano na recolha deste tipo de informação, o que pode comprometer a fiabilidade dos resultados obtidos (Maganinho, 2013).

O processo de recolha visual de dados da superfície de pavimentos aeroportuários tem vindo a ser alterado pela evolução tecnológica, que agregou dispositivos técnicos nessa dimensão de coleta de informações. Em alternativa ao método tradicional de recolha de dados a pé surgiram métodos com recurso a veículos terrestres e aéreos equipados, de natureza multifuncional, que atuam na captação e também no tratamento inicial dos dados das superfícies dos pavimentos a serem analisados.

Tendo em conta o exposto, a escolha do método de recolha de dados que fornecerá as informações necessárias para avaliar o estado dos pavimentos é fundamental para o sucesso do SGPA, sendo necessário conhecer os diferentes instrumentos de recolha dessas informações. Só assim é possível escolher, entre as opções disponíveis, aquela que melhor se enquadra nas necessidades técnicas e na disponibilidade orçamentária e de tempo de cada infraestrutura aeroportuária.

No presente capítulo iremos discorrer sobre os diferentes mecanismos utilizados para o levantamento de informações em pavimentos aeroportuários, iniciando pela preparação da rede de pavimentos para o levantamento das degradações superficiais, os tipos de degradações superficiais em pavimentos aeroportuários e as técnicas de auscultação utilizadas.

3.1 Preparação da rede de pavimentos para o levantamento das degradações

Independente do método de recolha de dados de deficiências do pavimento, este deve passar por algumas etapas de preparação da atividade.

Inicialmente deve ser feita uma revisão das informações de inventário existentes sobre os pavimentos do aeroporto/aeródromo em estudo. Estas informações devem estar contidas e organizadas na componente base de dados do SGPA, correspondendo a dados como o ano de construção, localização, dimensões, materiais, atividades de manutenção e reabilitação efetuadas, entre outros.

Após a organização de todas as informações referentes à rede de pavimentos do aeroporto em estudo, deve ser definida, dentro da base de dados do SGPA, uma hierarquia organizacional de todos os pavimentos do aeroporto. Esta hierarquia pode ser definida segundo o apresentado na secção 2.4.2.1, resultando na divisão da rede de pavimentos em ramos, secções e unidades de amostra (MDOT, 2008) (ASTM D5340-12, 2012). Dentre as unidades de amostra serão selecionadas um número mínimo a inspecionar que garanta a fiabilidade dos resultados.

Os mapas de definição de rede que identificam a localização de todos os ramos, secções e unidades de amostra devem ser preparados para cada infraestrutura a inspecionar e fornecidos nos relatórios aeroportuários.

Antes de iniciar a recolha das degradações existentes na superfície do pavimento e durante todo o processo, é ainda necessário e desejável o recurso ao uso de catálogos de degradações para auxiliar os técnicos de levantamento a identificar adequadamente cada tipo e nível de gravidade das degradações.

3.2 Degradações superficiais em pavimentos aeroportuários

É importante entender a mudança do estado dos pavimentos ao longo da sua vida útil e, por conseguinte, os mecanismos que causam a sua deterioração. Este entendimento permite identificar as causas que levaram ao estado atual dos pavimentos e escolher a estratégia mais adequada para sua conservação e/ou reabilitação (FAA, 2014).

As cargas a que os pavimentos se encontram sujeitos devido ao tráfego dos aviões, junto com os efeitos adversos do clima, provocam desgastes e, conseqüentemente, desenvolvimento de defeitos que, se não avaliados e corrigidos atempadamente, aumentam, acelerando a deterioração do pavimento. Além disso, a diminuição do desempenho do pavimento pode ainda dever-se à baixa qualidade dos materiais constituintes e/ou técnicas ineficazes de construção.

De forma a obter resultados fiáveis na avaliação dos pavimentos, são disponibilizados documentos que suportam a identificação das degradações e que devem ser utilizados pelos técnicos responsáveis pela inspeção, os catálogos de degradações. Estes catálogos constituem um documento de referência que apresentam, para cada tipo de pavimento e tipo de degradação, a respetiva descrição, os níveis de gravidade (com exemplos fotográficos) e modo de medição aplicável (U.S. Army Corps of Engineers, 2009) (U.S. Army Corps of Engineer, 2009) (ASTM D5340-12, 2012).

As degradações mais comuns consideradas na avaliação do estado dos pavimentos rígidos são: ruptura no canto da placa, fenda linear, fenda por intemperismo, fendas por contração, defeitos de selagem das juntas ou fendas, reparação pequena, reparação grande, desagregação superficial, bombeamento, escamação, descontinuidade/falha, placa quebrada/destruída, fragmentação nas juntas, frangmentação no canto da placa e reação Álcali-Agregado (ASR) (ASTM D5340-12, 2012) (Barca, et al., 2015).

As degradações mais comuns em pavimentos flexíveis são: pele de crocodilo, exsudação, fendas cruzadas, ondulação, depressões, erosão por “*jet-blast*”, fendas de reflexão das juntas da laje de betão – longitudinais e transversais, fendas longitudinais e transversais, fendas em forma de “meia-lua”, reparações e cortes técnicos, polimento de agregados, desagregação superficial dos agregados, rodeiras, escorregamento lateral devido às lajes de betão, derrame de óleo combustível ou outros solventes, empolamento e desagregação superficial do mástique em misturas betuminosas densas (ASTM D5340-12, 2012).

A Figura 3.1 apresenta os principais indicadores do estado dos pavimentos aeroportuários flexíveis, organizados por famílias de degradações, indicando ainda as respectivas origens e causas das degradações (Duran, 2015).

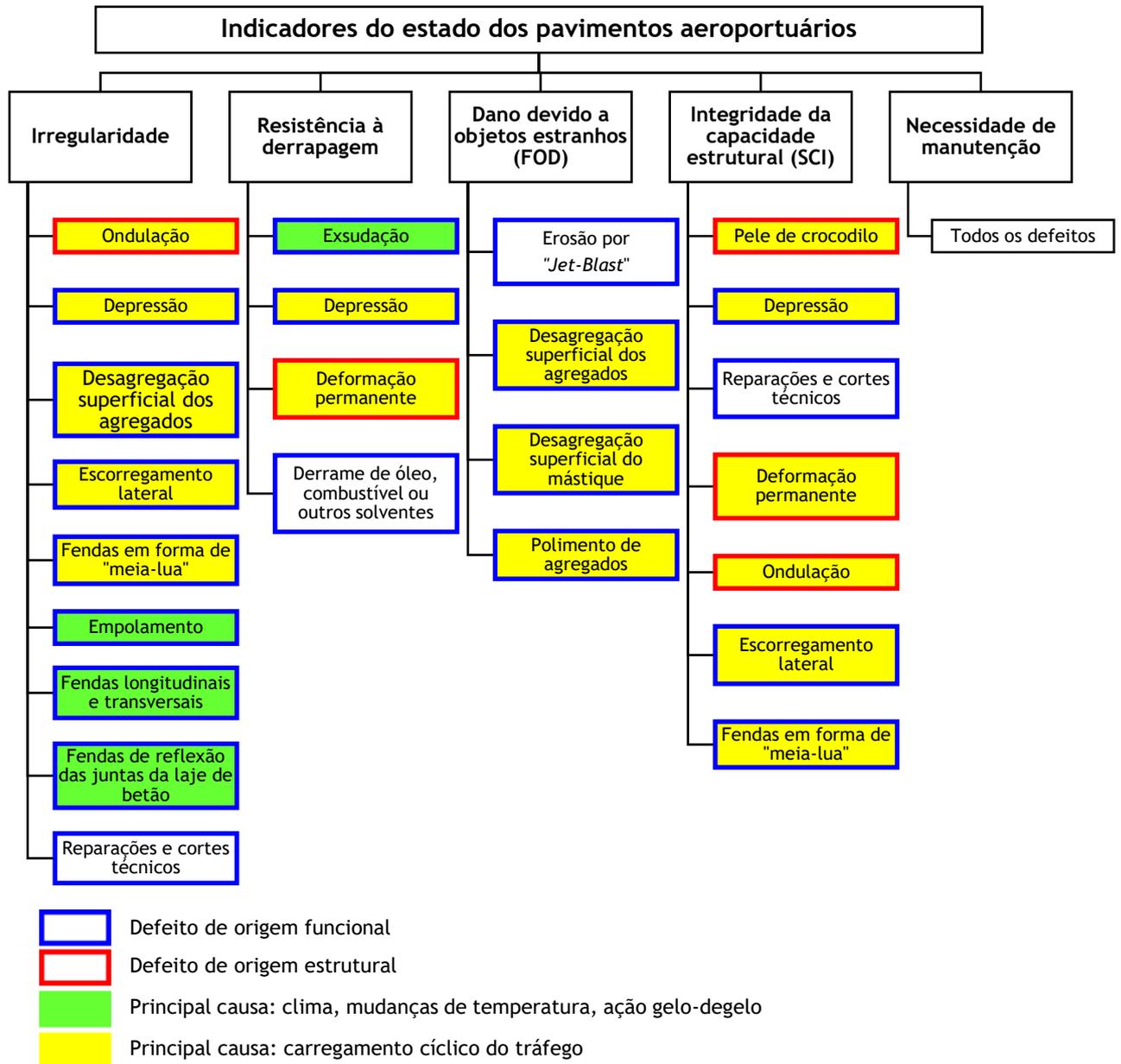


Figura 3.1 - Indicadores do estado dos pavimentos aeroportuários: famílias de degradações, degradações, origens e causas (adaptado de Duran, 2015).

Nas tabelas 3.1 e 3.2 são apresentadas a descrição dos níveis de gravidade, a forma de medição e algumas observações particulares das degradações superficiais de pavimentos flexíveis, uma vez que é este tipo de pavimento a ser estudado no caso prático do presente estudo.

As tabelas foram criadas tendo como base as descrições constantes na norma ASTM D 5340 – 12 (ASTM D5340-12, 2012) e no Manual “*Asphalt Surfaced Airfields* (U.S. Army Corps of Engineers, 2009).

Tabela 3.1 - Níveis de gravidade das degradações de pavimentos flexíveis aeroportuários (Parte 1).

PELE DE CROCODILO (Alligator or Fatigue Cracking)		
BAIXO – B	MÉDIO – M	ALTO – A
Fendas finas e longitudinais, paralelas umas às outras, sem nenhuma ou pouca interligação entre elas.	Pele de crocodilo bem definida e isenta de desagregação de material.	Pele de crocodilo bem definida, com possibilidade de desagregação de material e elevado potencial de <i>Foreign Object Damage</i> (FOD).
FENDAS CRUZADAS (Block Cracking)		
BAIXO – B	MÉDIO – M	ALTO – A
Pouca ou nenhuma desagregação. As fendas não preenchidas possuem abertura média máxima de 6 mm e as preenchidas possuem preenchimento em bom estado. Isento de potencial de FOD.	Fendas moderadamente desagregadas ou não desagregadas, com abertura média superior a 6 mm e com preenchimento em más condições. Pouco potencial de FOD.	Fendas bem definidas e severamente desagregadas. Elevado potencial de FOD.
ONDULAÇÃO (Corrugation)		
BAIXO – B	MÉDIO – M	ALTO – A
Pistas e caminhos de circulação de velocidade elevada: altura média < 6 mm. Caminhos de circulação e placas de estacionamento: altura média < 13 mm.	Pistas e caminhos de circulação de velocidade elevada: altura média de 6 a 13 mm. Caminhos de circulação e placas de estacionamento: altura média de 13 a 25 mm.	Pistas e caminhos de circulação de velocidade elevada: altura média > 13 mm. Caminhos de circulação e placas de estacionamento: altura média > 25 mm.
DEPRESSÕES (Depressions)		
BAIXO – B	MÉDIO – M	ALTO – A
Pistas e caminhos de circulação de velocidade elevada: profundidade média de 3 a 13 mm. Caminhos de circulação e placas de estacionamento: profundidade média de 13 a 25 mm.	Pistas e caminhos de circulação de velocidade elevada: profundidade média de 13 a 25 mm. Caminhos de circulação e placas de estacionamento: profundidade média de 25 a 51 mm.	Pistas e caminhos de circulação de velocidade elevada: profundidade média > 25 mm. Caminhos de circulação e placas de estacionamento: profundidade média > 51 mm.

Tabela 3.1 - Níveis de gravidade das degradações de pavimentos flexíveis aeroportuários (Parte 2).

FENDAS DE REFLEXÃO DAS JUNTAS DA LAJE DE BETÃO - LONGITUDINAIS E TRANSVERSAIS <i>(Join Reflection Cracking from PCC)</i>		
BAIXO – B	MÉDIO – M	ALTO – A
<p>Fendas com bordos levemente desagregados. Pouco ou nenhum potencial de FOD.</p> <p>Fendas não preenchidas: abertura ≤ 6 mm.</p> <p>Fendas preenchidas: qualquer abertura desde que o material de preenchimento esteja em bom estado</p>	<p>Fendas com bordos moderadamente desagregados com ligeiro fendilhamento aleatório junto às fendas ou junto à interseção entre fendas. Algum potencial de FOD.</p> <p>Fendas não preenchidas: bordos não desagregados ou ligeiramente desagregados com abertura média > 6 mm.</p> <p>Fendas preenchidas: bordos não desagregados ou ligeiramente desagregados com material de preenchimento em más condições.</p>	<p>Fendas severamente desagregadas, com material solto. Elevado potencial FOD.</p> <p>Fendas não preenchidas: abertura média qualquer.</p> <p>Fendas preenchidas: abertura média qualquer.</p>
FENDAS LONGITUDINAIS E TRANSVERSAIS - EXCETO AS FENDAS DE REFLEXÃO DAS JUNTAS DA LAJE DE BETÃO <i>(Longitudinal and Transverse Cracking - No Join Reflection Cracking from PCC)</i>		
BAIXO – B	MÉDIO – M	ALTO – A
<p>Fendas com bordos levemente desagregados. Pouco ou nenhum potencial de FOD.</p> <p>Fendas não preenchidas: abertura ≤ 6 mm.</p> <p>Fendas preenchidas: apresentam qualquer abertura desde que o material de preenchimento esteja em bom estado.</p>	<p>Fendas com bordos moderadamente desagregados com ligeiro fendilhamento aleatório junto às fendas ou junto à interseção entre fendas. Algum potencial de FOD.</p> <p>Fendas não preenchidas: bordos não desagregados ou ligeiramente desagregados com abertura média > 6 mm.</p> <p>Fendas preenchidas: bordos não desagregados ou ligeiramente desagregados com material de preenchimento em más condições.</p>	<p>Fendas severamente desagregadas, com material solto. Elevado potencial FOD.</p> <p>Fendas não preenchidas: abertura média qualquer.</p> <p>Fendas preenchidas: abertura média qualquer.</p>
REPARAÇÕES E CORTES TÉCNICOS <i>(Patching and Utility Cut Patch)</i>		
BAIXO – B	MÉDIO – M	ALTO – A
<p>Reparação em boas condições e com comportamento satisfatório.</p>	<p>Alguma deterioração da reparação com efeito na qualidade de circulação. Quantidade moderada de degradações presentes na reparação e/ou potencial FOD.</p>	<p>Reparação muito deteriorada com efeitos significativos na qualidade de circulação. Elevado potencial FOD. A reparação necessita de substituição urgente.</p>
DESAGREGAÇÃO SUPERFICIAL DOS AGREGADOS <i>(Raveling)</i>		
BAIXO – B	MÉDIO – M	ALTO – A
<p>A superfície do pavimento encontra-se no geral em bom estado, mas com perda de 5 a 20 agregados por m² de pavimento. A falta dos agregados grossos verifica-se em 2% da área examinada. Possui pouco ou nenhum potencial de FOD.</p>	<p>A cada m² de pavimento, a perda de agregado varia entre 21 e 40 unidades. A percentagem dos agregados grossos em falta verifica-se em 2% a 10% da área examinada. Possui algum potencial de FOD.</p>	<p>A cada m² de pavimento, o número de agregados em falta é superior a 40. A percentagem dos agregados grossos em falta é superior a 10% da área examinada. Possui elevado potencial de FOD.</p>

Tabela 3.1 - Níveis de gravidade das degradações de pavimentos flexíveis aeroportuários (Parte 3).

RODEIRAS (Rutting)		
BAIXO – B	MÉDIO – M	ALTO – A
A profundidade da rodeira varia entre 6 a 13 mm.	A profundidade da rodeira varia entre 13 a 25 mm.	A profundidade da rodeira é superior a 25 mm.
ESCORREGAMENTO LATERAL DEVIDO ÀS LAJES DE BETÃO (Shoving of Asphalt Pavement by PCC Slabs)		
BAIXO – B	MÉDIO – M	ALTO – A
Ligeira dilatação da laje de betão, com pouco efeito na qualidade de circulação do tráfego e isento de fendilhamento no pavimento. A altura média do empolamento é inferior a 19 mm.	Dilatação significativa da laje de betão, com fendilhando do pavimento. A altura média do empolamento é de 19 mm a 38 mm.	Elevada dilatação da laje de betão causando fendilhamento severo no pavimento. A altura média do empolamento é superior a 38 mm.
EMPOLAMENTO (Swell-Distress)		
BAIXO – B	MÉDIO – M	ALTO – A
Empolamento pouco visível que afeta ligeiramente a circulação do tráfego. A altura do empolamento é inferior a 20 mm.	Empolamento facilmente observável que afeta de forma moderada a circulação do tráfego. A altura do empolamento é de 20 mm a 40 mm.	Empolamento facilmente observável que afeta de forma significativa a circulação do tráfego. A altura do empolamento é superior a 40 mm.
DESAGREGAÇÃO SUPERFICIAL DO MÁSTIQUE EM MISTURAS BETUMINOSAS DENSAS (Weathering in Surface Wear - Dense Mix Asphalt)		
BAIXO – B	MÉDIO – M	ALTO – A
A superfície do pavimento apresenta sinais de envelhecimento. É possível identificar a perda de mástique acompanhada de descoloração do betume. Os agregados grossos começam a estar expostos (menos de 1 mm). O pavimento pode ser relativamente novo (6 meses de idade).	A perda do mástique é notória e 1/4 da maior dimensão do agregado está exposta.	Perda muito significativa do mástique com mais de 1/4 da maior dimensão do agregado exposta. Há risco de desprendimento de partículas de agregado.
NOTA: As degradações do tipo exsudação; erosão por “jet-blast”; derrame de óleo, combustível ou outros solventes; polimento de agregados; e fendas em forma de “meia-lua” não são definidos níveis de gravidade, sendo apenas registada a sua existência na superfície do pavimento.		

Tabela 3.2 - Degradações de pavimentos flexíveis aeroportuários: medição e observações particulares
(Parte 1).

DEGRADAÇÃO	NÍVEIS DE GRAVIDADE	MEDIÇÃO	UNIDADE	OBSERVAÇÕES (ASTM D5340-12, 2012)
PELE DE CROCODILO <i>(Alligator or Fatigue Cracking)</i>	B, M, A	Área da superfície afetada	m ²	Ao verificar diferentes níveis de gravidade, devem ser registados separadamente, ou registar o nível de gravidade predominante caso não seja fácil fazer a distinção dos níveis.
EXSUDAÇÃO <i>(Bleeding)</i>	N.A.	Área da superfície afetada	m ²	-
FENDAS CRUZADAS <i>(Block Cracking)</i>	B, M, A	Área da superfície afetada	m ²	Ao verificar diferentes níveis de gravidade, deve-se registá-los separadamente. Em pavimentos flexíveis, não incluindo pavimentos semirrigidos, não se deve registar fendas cruzadas e fendas longitudinais e transversais na mesma área.
ONDULAÇÃO <i>(Corrugation)</i>	B, M, A	Área da superfície afetada	m ²	-
DEPRESSÕES <i>(Depressions)</i>	B, M, A	Área da superfície afetada	m ²	Depressões com largura superior a 3 m devem ser medidas por estimativa visual ou por medição direta quando estão preenchidas por água.
EROSÃO POR "JET-BLAST" <i>(Jet-Blast Erosion)</i>	N.A.	Área da superfície afetada	m ²	-
FENDAS DE REFLEXÃO DAS JUNTAS DA LAJE DE BETÃO - LONGITUDINAIS E TRANSVERSAIS <i>(Join Reflection Cracking from PCC)</i>	B, M, A	Comprimento das fendas	M	Ao verificar diferentes níveis de gravidade, devem ser registados separadamente, ou registar o nível de gravidade predominante caso não seja fácil fazer a distinção dos níveis.
FENDAS LONGITUDINAIS E TRANSVERSAIS - EXCETO AS FENDAS DE REFLEXÃO DAS JUNTAS DA LAJE DE BETÃO <i>(Longitudinal and Transverse Cracking - No Join Reflection Cracking from PCC)</i>	B, M, A	Comprimento das fendas	M	Ao verificar diferentes níveis de gravidade, devem ser registados separadamente, ou registar o nível de gravidade predominante caso não seja fácil fazer a distinção dos níveis.
DERRAME DE ÓLEO, COMBUSTÍVEL OU OUTROS SOLVENTES <i>(Oil Spillage)</i>	N.A.	Área da superfície afetada	m ²	Esta degradação só é registada em caso de perda de material ou amaciamento do betume.
LEGENDA	B= Nível de gravidade baixo M= Nível de gravidade médio A= Nível de gravidade alto N.A.= Não aplicável - Não são definidos níveis de gravidade para esta degradação u.a.= unidade de amostra			

Tabela 3.2 - Degradações de pavimentos flexíveis aeroportuários: medição e observações particulares
(Parte 2).

DEGRADAÇÃO	NÍVEIS DE GRAVIDADE	MEDIÇÃO	UNIDADE	OBSERVAÇÕES (ASTM D5340-12, 2012)
REPARAÇÕES E CORTES TÉCNICOS (<i>Patching and Utility Cut Patch</i>)	B, M, A	Área da superfície afetada	m ²	Ao verificar diferentes níveis de gravidade, devem ser registados separadamente. Reparações com área superior a 230 m ² devem ser consideradas separadamente como uma u.a. ou secção.
POLIMENTO DE AGREGADOS (<i>Polished Aggregate</i>)	N.A.	Área da superfície afetada	m ²	-
DESAGREGAÇÃO SUPERFICIAL DOS AGREGADOS (<i>Raveling</i>)	B, M, A	Área da superfície afetada	m ²	Danos mecânicos causados ao pavimento por ganchos, jantes de pneus ou limpa neves são considerados no nível de gravidade mais alto.
RODEIRAS (<i>Rutting</i>)	B, M, A	Área da superfície afetada	m ²	-
ESCORREGAMENTO LATERAL DEVIDO ÀS LAJES DE BETÃO (<i>Shoving of Asphalt Pavement by PCC Slabs</i>)	B, M, A	Área da superfície afetada	m ²	-
FENDAS EM FORMA DE "MEIA-LUA" (<i>Slippage Cracking</i>)	N.A.	Área da superfície afetada	m ²	-
EMPOLAMENTO (<i>Swell-Distress</i>)	B, M, A	Área da superfície afetada	m ²	Os níveis de gravidade devem considerar o efeito na qualidade de circulação e o tipo de secção.
DESAGREGAÇÃO SUPERFICIAL DO MASTIQUE EM MISTURAS BETUMINOSAS DENSAS (<i>Weathering in Surface Wear - Dense Mix Asphalt</i>)	B, M, A	Área da superfície afetada	m ²	Esta degradação não é registada caso se registre a desagregação superficial do agregado (Raveling) com nível de gravidade médio ou alto.
LEGENDA	B= Nível de gravidade baixo M= Nível de gravidade médio A= Nível de gravidade alto N.A.= Não aplicável - Não são definidos níveis de gravidade para esta degradação u.a.= unidade de amostra			

3.3 Técnicas de auscultação

A inspeção visual como método de recolha de dados de pavimentos aeroportuários evoluiu da inspeção tradicional realizada a pé, onde o tipo, a gravidade e a quantidade da degradação são identificadas e registradas em papel, para o uso de veículos multifuncionais. Os métodos de recolha de dados instalados em veículos multifuncionais são compostos por um ou mais equipamentos de captura e por aplicações automáticas ou semi-automáticas de pós-processamento para processos de extração de dados, tendo como base algoritmos de visão computacional e processamento de imagem (Ragnoli, et al., 2018).

Os últimos desenvolvimentos na tecnologia de recolha de dados de pavimentos de estradas e aeroportos, se concentram na utilização de veículos aéreos não tripulados (VANTs - drones), incluindo a tecnologia *Land Mobile Light Detection and Ranging* (LiDAR) (Brooks, et al., 2018) (Complete, et al., 2019) (Jiang, et al., 2020).

3.3.1 Levantamento a pé

No levantamento a pé ou tradicional, um ou mais inspetores realizam a auscultação do pavimento a pé, identificando e registando o tipo, a quantidade e a intensidade das degradações por inspeção visual direta.



Figura 3.2 - Inspeção visual tradicional (Lima, 2016).

Segundo Lima, Santos & Almeida (2017), esse tipo de inspeção envolve as seguintes quatro etapas:

- (1) Localização dos limites das unidades de amostra a inspecionar.
- (2) Identificação e avaliação do nível de gravidade das degradações existentes (baixo (B), médio (M) e alto (A)).

(3) Medição do comprimento, área ou profundidade das degradações identificadas.

(4) Preenchimento da folha de levantamento ou ficha de registo digital (por exemplo, através de um tablet) correspondente a cada unidade de amostra a inspecionar.

Antes de iniciar a inspeção do pavimento é importante ter um mapa com a localização das unidades de amostra, de modo apoiar os inspetores no levantamento. A localização das unidades de amostra a inspecionar e aferição das áreas, comprimentos e profundidades das degradações é efetuada com auxílio de uma roda de medição, giz e duas réguas, uma de 3 metros de comprimento e uma de 40 centímetros de comprimento com escala milimétrica, registando-se a informação em suporte de papel ou folha de registo de levantamento preparada para o efeito (ASTM D5340-12, 2012) (Lima, et al., 2017).

É no suporte de papel ou em folha de registo estruturada para este fim que o operador regista para cada amostra no mínimo as seguintes informações ao efetuar o levantamento da superfície do pavimento: data, localização, ramo, secção, tamanho da unidade de amostra, existência ou não de cada tipo de degradação, sua área ou comprimento efetivo, o respectivo nível de gravidade e nomes dos inspetores. A partir das medições efetuadas é possível obter a densidade superficial de cada tipo de degradação (extensão relativa da área afetada, expressa em percentagem). A quantificação das degradações permitirá determinar o *Pavement Condition Index* (PCI) de cada unidade de amostra e da secção a que pertencem.

Na Figura 3.3 é apresentado um exemplo de uma folha de levantamento do estado de pavimento flexível para uma unidade de amostra.

delimitação das áreas das unidades de amostra no local também podem apresentar algumas dificuldades, sendo desejável que se recorra a pontos de referência que garantam a localização apropriada das mesmas. Refere-se ainda que em infraestruturas aeroportuárias com extensão significativa de pavimentos e tráfego constante é mais difícil realizar este tipo de levantamento, devido a restrições operacionais que limitam o tempo de acesso aos pavimentos (Lima, et al., 2019) (Feitosa, et al., 2019).

Além disso, o ruído das aeronaves podem constituir um perigo para os inspetores, portanto, devem dispor de proteção auditiva a todo o momento da inspeção visual. A inspeção visual precisa ser aprovada e coordenada junto a equipe operacional do aeroporto (ASTM D5340-12, 2012).

A principal vantagem deste método é a possibilidade de identificar no local, por visualização direta, as degradações e os seus respectivos níveis de gravidade (Lima, et al., 2019) (Feitosa, et al., 2019).

3.3.2 Levantamento em veículo equipado

Atualmente existem no mercado um conjunto significativo de soluções tecnológicas para a recolha e extração de informação sobre o estado dos pavimentos. Grande parte destas soluções tecnológicas podem ser instaladas em veículos multifuncionais, que tanto são utilizados em ambientes rodoviários quanto em aeroportuários.

Entre os equipamentos mais comuns instalados em veículos multifuncionais destacam-se o GPS/GNSS, para georreferenciação da localização dos ativos; os módulos de registo de vídeo, para registar vídeos da superfície do pavimento e imagens completas de 360°; o *Laser Crack Measurement System* (LCMS), para recolha de perfis 3D de alta precisão da superfície do pavimento; o *Laser Rut Measurement System* (LRMS), que fornece perfis transversais imediatos e precisos que permitem identificar rodeiras no pavimento; hodômetro de alta resolução, que fornece a distância linear; o perfilómetro a laser, que fornece a rugosidade - IRI, macrotextura e perfil longitudinal do pavimento; e o *Land Mobile Light Detection and Ranging* (LiDAR), para a obtenção de informações tridimensionais sobre a superfície terrestre.

Vários estudos encontrados na literatura testaram, discutiram e usaram dados obtidos por estes módulos e sistemas no contexto da inspeção de pavimentos aeroportuários (Keegan, et al., 2014) (Di Mascio, et al., 2019) (Barbarella, et al., 2019).

Nas secções seguintes são apresentados e descritos alguns exemplos de equipamentos e soluções multifuncionais, nomeadamente: VIZIROAD, *Multi Functional Vehicle* (MFV), *Laser Rut Measurement System* (LRMS) e sistema móvel multifuncional de baixo custo.

3.3.2.1 VIZIROAD

Originalmente desenvolvido para ser utilizado em ambiente rodoviário, o sistema VIZIROAD foi também utilizado para aquisição de dados em pavimentos aeroportuários (ver Figura 3.4).

Trata-se de um sistema instalado numa viatura que é composto por um computador portátil e dois teclados de registo de eventos pré-definidos, que possuem um conjunto de teclas que permitem registar a identificação de um determinado parâmetro (degradação) e nível de gravidade à medida que o veículo se desloca ao longo do pavimento. O sistema encontra-se ligado ao conta-quilómetros da viatura, permitindo assim que os eventos registados sejam referenciados pela distância linear percorrida (em metros) desde o início da secção em análise até à degradação identificada (Santos, et al., 2006) (Estradas de Portugal, 2008) (Horta, et al., 2013).



Figura 3.4 - Equipamento VIZIROAD com GPS associado (Horta, et al., 2013).

Este tipo de equipamento é configurável, existindo a possibilidade de adaptar o software ao tipo de informação que se pretende observar, tendo em atenção o tipo de patologias esperadas em ambiente aeroportuário (Fernandes, 2010).

3.3.2.2 Multi Functional Vehicle (MFV)

O *Multi Functional Vehicle* (MFV) é um sistema de coleta de dados que permite a realização de operações de auscultação em infraestruturas viárias e aeroportuárias a partir de um veículo que se desloca a velocidades normais de tráfego, portanto, não há necessidade de operações específicas de gestão de tráfego. O sistema consiste em um veículo multifuncional que combina um perfilómetro laser RSP (*Road Surface Profiler*) com o *Laser Crack Measurement System* (LCMS) (Dynatest International, 2017).

O perfilómetro laser RSP permite a medição do perfil transversal e longitudinal, *International Roughness Index* (IRI), *Ride Number* (RN), rodeiras, macrotextura e dados GPS (Dynatest International, 2017).

Esse sistema conta com duas versões, o perfilómetro a laser RPS-III e o perfilómetro a laser RPS-IV.

Os principais benefícios do perfilômetro laser RPS-III são (Dynatest International, 2017):

- Analisa rapidamente a rugosidade de todas as secções da rede;
- Com a opção GPS, todos os dados podem ser facilmente integrados num SIG;
- Possui a funcionalidade "STOP&GO" que permite medições em pequenas secções e ruas urbanas, tornando-o uma ferramenta ideal para ser utilizada ao nível de projeto, bem como para a recolha e análise de dados ao nível da rede;
- Funciona à velocidade do tráfego;
- Permite a recolha, análise e armazenamento de dados em tempo real;
- Os lasers podem recolher dados de IRI, RN e macrotextura simultaneamente numa única execução;
- A monitorização automática das leituras laser assegura uma elevada qualidade dos dados;
- Dados altamente precisos, repetíveis e reprodutíveis, permitindo a sua utilização num SGPA.

O perfilômetro laser RPS-IV é a versão portátil desse sistema, facilmente acoplável a qualquer veículo (Dynatest International, 2017).

As duas versões do perfilômetro a laser RPS podem ser instalados em um veículo multifuncional junto ao LCMS, permitindo o levantamento automatizado e preciso de degradações superficiais do pavimento à velocidade do tráfego no período diurno ou noturno (Dynatest International, 2017).

O LCMS permite gerar imagens 2D ou 3D do pavimento em uma largura de 4 m para detecção e classificação do fendilhamento (Dynatest International, 2017).

A Figura 3.5 ilustra o perfilômetro laser RPS-III, o perfilômetro laser RPS-IV acoplado a um veículo e o veículo multifuncional (MFV), composto da união do perfilômetro laser RPS com o LCMS.



Figura 3.5 - a) Perfilômetro Laser RPS-III; b) Perfilômetro Laser RPS-IV; c) Veículo Multifuncional (MFV) (adaptado de Dynatest International, 2017).

3.3.2.3 ROMDAS (*ROad Measurement Data Acquisition System*)

O *ROad Measurement Data Acquisition System* (ROMDAS) foi desenvolvido pela *Data Collection Ltd.* (DCL), e consiste em um sistema modular abrangente e económico que recolhe informações sobre o estado dos pavimentos passível de ser instalado em qualquer veículo (ROMDAS, 2016).

É utilizado principalmente para a obtenção do inventário da rede de pavimentos, levantamento automático de dados sobre o estado de estradas pavimentadas ou não pavimentadas, obtenção de ativos sobre os pavimentos (rugosidade, macrotextura e perfil transversal), planeamento de atividades de M&R da rede de pavimentos, projetos de investigação e mapeamento móvel de corredores rodoviários no SIG, e análise *Highway Development and Management model* (HDM-4) (ROMDAS, 2016).

O HDM-4 é um modelo de desenvolvimento e gestão de estradas, *International Road Assessment Programme* (iRAP) ou outras inspeções de segurança baseadas em vídeo (ROMDAS, 2016).

O sistema ROMDAS básico inclui, em sua composição, os principais elementos de hardware, hodómetro, interfaces e licenças de software para recolher informações sobre os pavimentos. O usuário tem a opção de personalizar o sistema, adicionando módulos ao sistema ROMDAS básico para registar conjuntos de dados adicionais de acordo com as necessidades do projeto (ROMDAS, 2018).

A Figura 3.6 ilustra os diferentes módulos disponíveis para o sistema ROMDAS, nomeadamente: *Laser Crack Measurement System* (LCMS), registo de vídeo, perfilómetro a laser, *Transverse Profile Logger* (TPL), *High Resolution Distance Measuring Instrument* (HR DMI), integrador de

bump, geometria rodoviária, teclado de classificação de degradações, computador de levantamento e GPS/GNSS.

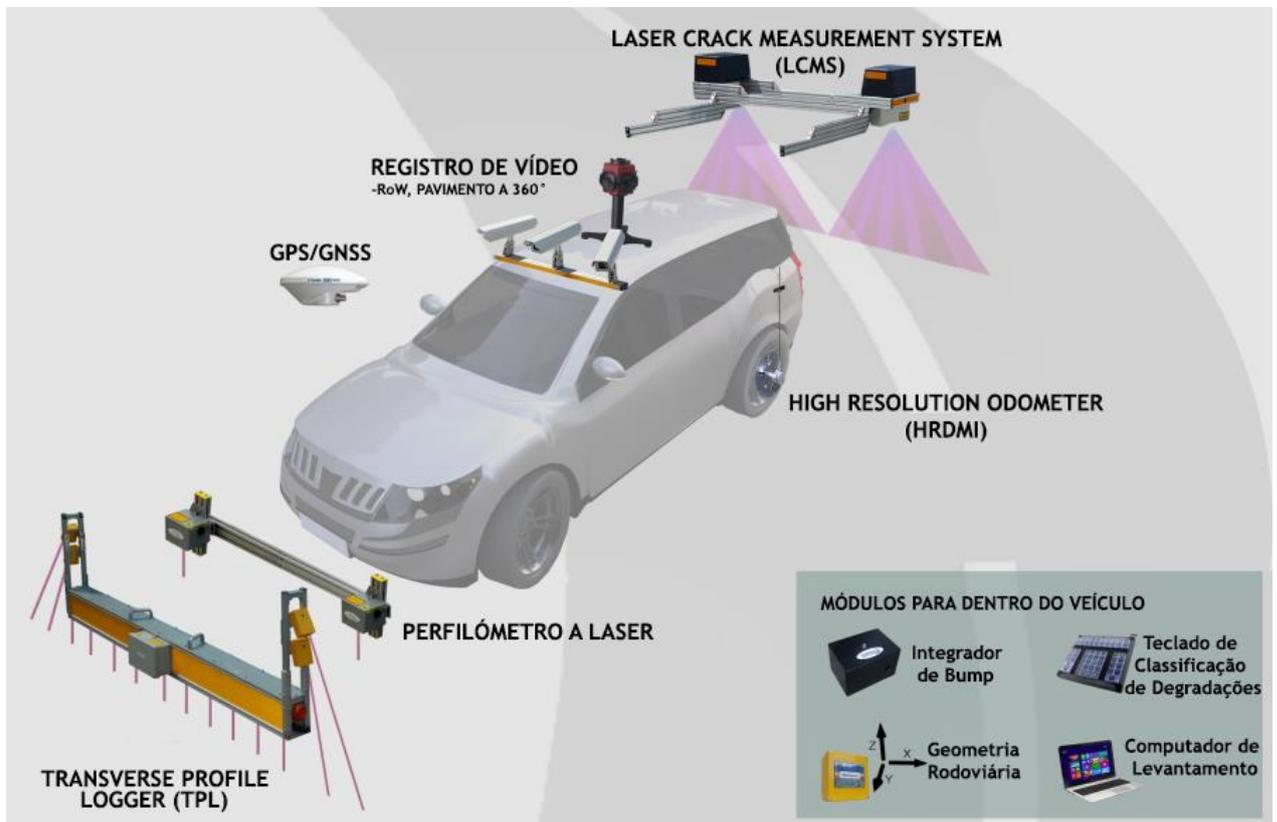


Figura 3.6 - Sistema ROMDAS (adaptado de ROMDAS, 2016).

Os principais módulos desse sistema e suas respectivas definições são descritos na Tabela 3.3. Essa tabela foi criada tendo como base as descrições constantes no sítio da internet “ROMDAS: Providers of Innovative Technology for Measuring and Managing Roads” (ROMDAS, 2018) e o documento “ROMDAS System Overview” (ROMDAS, 2016).

Tabela 3.3 - Módulos disponíveis para o Sistema ROMDAS (Parte 1).

MÓDULOS DISPONÍVEIS PARA O SISTEMA ROMDAS	DESCRIÇÃO
<p data-bbox="237 353 612 416"><i>Laser Crack Measurement System (LCMS)</i></p> 	<p data-bbox="628 398 1364 640">O LCMS possui 2 lasers de varredura de alta precisão e executa uma gravação detalhada de perfis 3D da superfície do pavimento. Analisa e calcula uma variedade de dados (como tipo, dimensões e vedação de fendas, dimensões e área de secção transversal de rodeiras, macrotextura do pavimento, falhas e juntas de PCC, profundidade de poças de água e reconhece imagens de pavimento sobrepostas automaticamente na identificação das degradações).</p>
<p data-bbox="336 701 515 728">Registo de vídeo</p> 	<p data-bbox="628 712 1364 954">Regista vídeos da superfície do pavimento para acessar suas configurações a partir de 3 tipos de câmeras disponíveis: câmeras <i>Right Of Way (ROW)</i>; câmeras de visualização do pavimento, montadas perpendicularmente à estrada; e câmeras 360° que registam imagens completas de 360° e se combinadas com software de mapeamento móvel garantem uma visão imersiva do corredor rodoviário.</p> <p data-bbox="628 958 1211 985">O número de câmaras e as direções são personalizáveis.</p>
<p data-bbox="312 1019 539 1046">Perfilómetro a laser</p> 	<p data-bbox="628 1102 1364 1232">O perfilómetro a laser utiliza a combinação de um laser e um acelerómetro para medir o perfil de elevação da estrada em velocidades de tráfego com elevada precisão. Fornece a rugosidade - IRI, macrotextura e perfil longitudinal do pavimento.</p>
<p data-bbox="248 1337 603 1364"><i>Transverse Profile Logger (TPL)</i></p> 	<p data-bbox="628 1429 1364 1527">Feixe laser que mede o perfil transversal da estrada. Prático para utilização em levantamentos da rede de pavimentos de pequena e grande escala, inspeções pós-construção e auscultações de rotina.</p>

Tabela 3.3 - Módulos disponíveis para o Sistema ROMDAS (Parte 2).

MÓDULOS DISPONÍVEIS PARA O SISTEMA ROMDAS	DESCRIÇÃO
<p><i>High Resolution Distance Measuring Instrument (HR DMI)</i></p> 	<p>O Instrumento de medição de distância de alta resolução (HR DMI) é utilizado em situações onde são necessárias medições de distâncias extremamente precisas (< 0,1 m). Não foi projetado para uso prolongado em estradas não pavimentadas.</p>
<p>Integrador de bump</p> 	<p>Equipamento utilizado para medir a rugosidade e calcular o IRI do pavimento. Projetado para ser utilizado em ambientes de condições difíceis e estradas não pavimentadas onde equipamentos a laser mais sensíveis não são aplicáveis.</p>
<p>GEOMETRIA RODOVIÁRIA</p> 	<p>Regista a geometria do pavimento em velocidades normais de tráfego através de GPS integrado e Unidade de Medida Inercial (UMI) com um sistema de navegação, posicionamento e localização de referência para fornecer dados fiáveis sobre a geometria do pavimento (inclinação transversal, raio de curvatura e outras características geométricas).</p>
<p>GPS/GNSS</p> 	<p>O GPS/GNSS é utilizado para fornecer a referência exata do veículo através de satélites GPS. Os dados GPS podem ser utilizados para estabelecer a linha central do pavimento ou referenciar outros conjuntos de dados recolhidos simultaneamente por um sistema ROMDAS.</p>
<p>Laser Rut Measurement System (LRMS)</p> 	<p>O LRMS fornece perfis transversais imediatos e precisos usados para a detecção e caracterização de rodeiras no pavimento. Afere perfis transversais completos de 4 m de largura em velocidades normais de tráfego durante o dia ou noite. Fornece duas opções de taxa de amostragem: 30 ou 250 Hz (perfis do segundo).</p>

3.3.3 Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) com a tecnologia *Light Detection And Ranging* (LiDAR)

A utilização de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) combinados a tecnologia *Light Detection And Ranging* (LiDAR) surgem como uma solução para o aumento da eficiência no processo de recolha de informações sobre a superfície terrestre, visto que o fazem com elevada precisão, fornecendo dados fiéis e detalhados da área mapeada. Essas ferramentas tornaram-se plataformas poderosas por possibilitar a aquisição rápida de dados e por permitir a inspeção de áreas inacessíveis para procedimentos (GEOeduc, 2018).

O sistema LiDAR é uma tecnologia que permite a obtenção de informações tridimensionais acerca da superfície terrestre. Essa tecnologia permite coletar dados precisos e com velocidade ao combinar numa plataforma aerotransportada, o Sistema de Navegação Global por Satélites (*Global Navigation Satellite Systems* - GNSS), que fornece a posição da aeronave, e o Sistema de Navegação Inercial (*Inertial Navigation System* - INS), que determina os ângulos de atitude da aeronave, possibilitando assim o cálculo da distância entre o sensor e o alvo situado no terreno e/ou outras informações a respeito de um determinado ativo distante (GEOeduc, 2018) (Carvalho, et al., 2019).

O funcionamento desta tecnologia fundamenta-se na emissão de pulsos laser que disparam rapidamente, varrendo a superfície e obtendo múltiplas reflexões desta, portanto, vários pulsos laser podem ser refletidos sobre um mesmo alvo. O sensor LiDAR regista a luz refletida, reconhece sua velocidade e regista o tempo desde que o pulso é emitido até o momento em que é refletido para calcular a distância do intervalo entre o sensor e o alvo. A integração dos alcances do laser com os dados de orientação e posição, gerados pelos sistemas GNSS e INS, dados de calibração e ângulos de varrimento, produzem um poderoso e denso grupo de detalhes de pontos de elevação, nomeado de “nuvem de pontos”, permitindo uma gama de tipos de análise de dados (NEON, 2016) (Carvalho, et al., 2019) (NOAA, 2020).

Cada ponto da superfície do pavimento que foi refletido um pulso laser possui coordenadas espaciais tridimensionais (latitude, longitude e altitude) que, por conseguinte, representam um ponto da nuvem de pontos. Cada levantamento possui milhões de pontos, tornando-o mais completo e de custo reduzido se comparado a outros procedimentos para a mesma finalidade, já que é realizado em um tempo menor devido a velocidade na recolha dos dados e necessita de menos recursos humanos, uma vez que a maioria das tarefas são executadas em gabinete (NEON, 2016) (Carvalho, et al., 2019) (NOAA, 2020).

De acordo com Yen, Ravani & Lasky, 2011 (Yen, et al., 2011), a tecnologia LiDAR aponta para múltiplos benefícios, nomeadamente, detalhamento da informação recolhida devido a nuvem de pontos que possibilitam a representação da realidade com fiabilidade; segurança, devido ser um veículo não tripulado que possui capacidade de levantamento em períodos noturnos e diurnos sem interrupção do tráfego; redução de custos; redução de tempo; e elevada precisão.

Existem no mercado soluções de drones que combinam VANTs quadricóptero, uma carga útil LiDAR e um fluxo de trabalho de software totalmente integrado (ver Figura 3.7) (Microdrones, 2019).



Figura 3.7 - Drone LiDAR quadricóptero mdLiDAR3000 (Microdrones, 2019).

A utilização de VANT semiautomatizado já permite o monitoramento de tráfego em rodovias, de modo a detectar, através de vídeo, veículos e características geométricas da infraestrutura com o menor número de anotações manuais. Sua realização divide-se em seis etapas: (1) registo de pontos de referência, para calcular a velocidade e a distância real; (2) registo rodoviário, para recolha de características geométricas das estradas; (3) registo de veículos; (4) estimativa de registo *frame-by-frame*, para estimar automaticamente pontos de referência e características das rodovias e do tráfego; (5) estimativa de registo de saída, referente aos dados obtidos em (2), (3) e (4) para visualização e análise de estatísticas de fluxo de tráfego; (6) análise de tráfego e animação, para representação dos dados recolhidos nas etapas anteriores (Brooks, et al., 2018) (Complete, et al., 2019) (Jiang, et al., 2020).

4 Análise Estatística para Comparação de duas Amostras

4.1 Introdução

Neste capítulo são apresentadas algumas referências e conceitos sobre estatística, de modo a auxiliar no contexto do caso de estudo apresentado, através da utilização desta ferramenta para análise das informações no âmbito da investigação que se pretende realizar.

A estatística tem como finalidade, resumir, descrever e tirar conclusões sobre situações sujeitas a incertezas, podendo utilizar para este feito, tabelas, indicadores estatísticos e apresentações gráficas. Estuda os fenômenos que se repetem continuamente no intuito de serem representados de forma generalizada e resumida. Um fenômeno pode ser traduzido por uma ou inúmeras variáveis. Determina as relações que possam existir ou não entre as variáveis em estudo ou verifica a forma como ocorre sua variação (Sá, 1968).

A estatística traduz-se na recolha, análise e interpretação de variáveis quantitativas e qualitativas de uma amostra submetida a um estudo (por exemplo, gênero, altura, degradações de um pavimento, respostas de sondagens). Possui um conjunto de métodos para a programação de estudos e experimentos, para a recolha de dados e consequentemente, para a organização, síntese, análise, interpretação e obtenção de conclusões (Triola, 2013). A estatística, portanto, tem como finalidade conhecer a amostra inteiramente de forma eficaz e resumida, reduzindo a probabilidade de admitir conclusões erradas.

Ainda, segundo Moraes (2005), “A Estatística tem por objetivo fornecer métodos e técnicas para tratar, racionalmente, com situações sujeitas a incertezas. A Estatística pode ser considerada como um conjunto de técnicas e métodos de pesquisa que entre outros tópicos envolve a planificação de experiências, a recolha e organização de dados, a inferência, o processamento, a análise e a disseminação de informação”.

Este âmbito de análise permite, com base em elementos observados e descritos, retirar conclusões para um domínio mais amplo de onde esses elementos provieram. Neste sentido, o presente capítulo tem como objetivo principal garantir o conhecimento necessário para desenvolver um estudo estatístico comparativo de duas amostras, de modo a recolher, organizar e analisar as variáveis destas, estabelecendo suas características mais importantes, suas correlações e a escolha do teste mais adequado à análise validativa (análise estatística comparativa), proporcionando interpretações, conclusões e limitações sobre a amostra em estudo.

Portanto, iremos discorrer sobre os diferentes conceitos utilizados para este estudo, iniciando pela definição do tipo das variáveis, descrição das amostras, determinação da normalidade das variáveis da amostra e finalizando com os testes de comparação estatística para validação de duas amostras.

4.2 Variáveis

O processo de análise estatística tem como objetivo analisar estatisticamente os dados (variáveis) de uma amostra e as informações que estes podem fornecer, de modo a retirar conclusões para um domínio mais amplo de onde essas variáveis derivaram (população de estudo). A análise depende substancialmente da forma como as variáveis em estudo foram medidas, da qualidade desta medição e da quantidade de informação fornecida (Marôco, 2014).

Os dados estatísticos são resultado final de observações recolhidas, que formam a base de estudo e análise estatística sobre o conteúdo desenvolvido. Estes podem se referir a uma população de estudo, quando todas as unidades de amostra do espaço são analisadas, ou a unidades de amostra, quando apenas uma parte da população de estudo é considerada para análise (Marôco, 2014).

As estatísticas de uma amostra são aplicadas para prever os verdadeiros valores populacionais, como a média, mediana e o desvio padrão da população, que são inicialmente desconhecidos. Esses valores são denominados parâmetros (Moraes, 2005).

As variáveis estatísticas podem ser numéricas ou não numéricas e são classificadas quanto às suas escalas de medida, podendo ser qualitativas ou quantitativas (Marôco, 2014; Moraes, 2005).

4.2.1 Variáveis qualitativas

São variáveis cuja escala de medida traduz informações que identificam alguma qualidade, categoria ou característica, que não são expressas numericamente, mas por classificação, assumindo várias modalidades. Estes tipos de variáveis podem ser medidas nos seguintes tipos de escala:

- Nominal. Exemplos: o estado civil (solteiro, casado, divorciado, viúvo) e o gênero (feminino, masculino) de um indivíduo.
- Ordinal. Exemplos: desempenho (baixo, médio, alto) e habilitações literárias (básico, secundário, universitário) de um indivíduo.

4.2.2 Variáveis quantitativas

São variáveis cuja escala de medida traduz informações resultantes de características suscetíveis de ordenação e quantificação de diferentes intensidades, que podem ser medidas numa escala do tipo:

- Intervalar, as quais não possuem uma medida de ausência de atributo (não possui zero absoluto), ou seja, é possível quantificar as distâncias entre as medições mas não existe um ponto nulo natural e uma unidade natural, por exemplo, temperatura medida em graus Celsius (30°C, 39°C, 15°C), onde não se pode assumir um ponto zero como ausência de temperatura, ou afirmar que a temperatura X é o dobro da temperatura Y.

- Razão, que possui zero absoluto, por exemplo, o peso (40 kg, 20 kg, 10 kg). Neste caso é possível quantificar as distâncias exatas entre as medições e existe um ponto nulo natural.

4.3 Amostra

Uma amostra é constituída por um conjunto de elementos, recolhidos ou selecionados de uma população por um procedimento definido (Peck, et al., 2008). A qualidade depende essencialmente da representatividade da amostra em relação à população em estudo. Em geral, um tamanho da amostra igual a 30 é aceitável, no entanto, este depende do grau de confiança que se pretende obter nos resultados, dos recursos e tempo disponíveis e do grau de pormenor pretendido com a análise (Moraes, 2005). O processo de compreensão da população através do estudo da amostra é denominado de inferência estatística. É necessário conhecer substancialmente a amostra de modo a caracterizá-la de forma correta, já que condiciona as análises e interpretações futuras.

De acordo com Marôco (2014) existem, basicamente, dois tipos de amostragem: amostragem probabilística ou aleatória e amostragem não probabilística ou não aleatória. Nos pontos a seguir apresenta-se uma breve definição dos dois tipos de amostras, seus modelos de amostragem e a relação entre amostras em estudo (independentes ou emparelhadas).

4.3.1 Amostragem probabilística ou aleatória

Neste tipo de amostragem a probabilidade de cada elemento da população fazer parte da amostra é igual para todos os elementos. Portanto, as amostras são obtidas aleatoriamente.

As características dos modelos mais comuns de amostragem probabilística ou aleatória estão descritos na Tabela 4.1, elaborada tendo como base a publicação de Marôco (2014).

Tabela 4.1 - Modelos de amostragem probabilística ou aleatória.

Modelos de Amostragem	Características
Aleatória simples	Todos os elementos da amostra são selecionados ao acaso.
Aleatória estratificada, proporcional ou por quotas	A população em estudo é dividida em subgrupos homogêneos, sendo a amostra final constituída por amostragem aleatória simples dos elementos pertencentes a cada um dos subgrupos homogêneos.
Aleatória sistemática	Seleciona-se os elementos de uma única unidade de amostra ao acaso, as outras são extraídas com intervalos fixos.
Aleatória por conglomerados, grupos ou áreas	A população em estudo é dividida em subgrupos exaustivos e mutuamente exclusivos que apresentam uma variabilidade semelhante à encontrada na população, sendo a amostra final obtida por amostragem aleatória simples dos subgrupos, conglomerados ou áreas formadas.
Aleatória multi-etapa	Combinação de dois ou mais métodos de amostragem.

4.3.2 Amostragem não-probabilística ou não-aleatória

Neste tipo de amostragem, a probabilidade de um determinado elemento da população pertencer à amostra não é igual ao dos restantes elementos. Portanto, as amostras neste caso não são obtidas aleatoriamente.

As características dos modelos mais comuns de amostragem não-probabilística ou não-aleatória estão descritos na Tabela 4.2, que foi elaborada com base na publicação de Marôco (2014).

Tabela 4.2 - Modelos de amostragem não-probabilística ou não-aleatória.

Modelos de Amostragem	Características
Acidental, casual ou conveniente	Seleciona-se os elementos por conveniência, por voluntariado ou ao acaso.
Objetiva	Seleciona-se os elementos com um determinado objetivo em mente, buscando acesso rápido a subgrupos restritos de interesse do estudo.
Modal	A amostra é constituída pelos elementos mais frequentes da população. Pode ser considerada um subtipo de amostragem objetiva.
Especialistas	A amostra é constituída por elementos que sejam especialistas ou possuam conhecimentos de uma determinada área.
Quotas	A amostra é constituída respeitando as quotas de uma determinada característica da população em estudo de uma forma não aleatória.
Heterogénea ou de diversidade	A amostra é constituída por elementos que integrem todas as características, opiniões etc., independente das quantidades com que estas se encontram na população.
Propagação geométrica (<i>snowball</i>)	A amostra é constituída por um indivíduo de interesse que depois recomenda outros indivíduos, e assim sucessivamente, aumentando a dimensão da amostra. Utiliza-se quando se pretende incluir na amostra sujeitos pouco acessíveis ou com alguma característica difícil de encontrar.

4.3.3 Amostras independentes e amostras emparelhadas

Para analisar estatisticamente duas amostras é importante determinar se estas possuem alguma ou nenhuma relação entre as suas variáveis, podendo ser classificadas em: amostras independentes ou amostras emparelhadas (Marôco, 2014).

As amostras independentes não possuem nenhum tipo de relação ou meio unificador entre suas variáveis, portanto, não é possível um sujeito pertencer a mais do que uma amostra. Em contrapartida, se as amostras são constituídas pelos mesmos sujeitos experimentais, tendo como base algum fator unificador entre suas variáveis, estas passam a ser chamadas de amostras emparelhadas, onde os sujeitos estão propositalmente relacionados (Marôco, 2014).

4.4 Análise estatística para comparação de duas amostras

As amostras, emparelhadas ou independentes, podem ser analisadas estatisticamente através de testes de hipóteses, paramétricos ou não-paramétricos, que são utilizados para testar a significância de fatores capazes de influenciar o desempenho da variável de medida, e sobretudo, determinar se estas possuem ou não um efeito significativo (Laureano, 2011) (Marôco, 2014). Visam, portanto, testar se dadas suposições que são feitas sobre, por exemplo, parâmetros da população ou sobre as suas distribuições são ou não rejeitadas.

A realização de um teste de hipótese segue uma metodologia de trabalho que visa a minimização dos erros de decisão (Laureano, 2011). Para sua seleção, devem ser considerados alguns fatores, como: tipo de variáveis, o tamanho e natureza das amostras e os objetivos pretendidos com o estudo. É viável, portanto, seguir uma metodologia composta por cinco fases: definição das hipóteses, definição da probabilidade de significância (α) para determinação da regra de decisão, identificação das principais características da amostra (probabilística ou aleatória/não-probabilística ou não-aleatória; independentes/emparelhadas) e da sua distribuição (normal/não normal), calcular estatisticamente o teste atribuído ao estudo de comparação de duas amostra e, por fim, determinar se a amostra é válida ou não válida, isto é, se as amostras estudadas são equivalentes ou não.

4.4.1 Definição das hipóteses

A tomada de decisão sobre as características da população fundamentam-se em hipóteses que, de um modo geral, são afirmações suportadas pelas distribuições das variáveis relativas às características da amostra que se pretendem analisar estatisticamente (Moraes, 2005).

Os testes de hipóteses tem a finalidade de analisar inferências que são feitas sobre a população. A definição das hipóteses deverão ser fundamentadas na teoria e nunca considerando o que é observado na amostra (Marôco, 2014).

Quando se formulam hipóteses estão a identificar-se variáveis e as suas relações, isto é, está-se a determinar o papel das variáveis na investigação. Por este motivo a identificação das variáveis e das suas relações é essencial para a definição de um modelo para o estudo que se pretende realizar.

Para cada característica a analisar estatisticamente definem-se duas hipóteses, de acordo Raul Laureano (2011):

- Hipótese nula (H_0) – corresponde à afirmação que é considerada verdadeira, até que se verifiquem evidências estatísticas da amostra que provem o contrário. Essa afirmação é a mais restritiva.
- Hipótese alternativa (H_A) – corresponde à afirmação contrária à hipótese nula, portanto, há presença de diferenças entre o observado na amostra e o que se está a afirmar sobre a população, cuja confirmação depende dos resultados do teste estatístico e do nível de significância (α) aplicado.

Assim, faz-se necessário definir o valor a partir do qual torna-se inverosímil a afirmação de H_0 , portanto, define-se a probabilidade máxima de aceitar a hipótese nula, isto é, o nível de significância para utilizar esta hipótese.

Caso ocorra rejeição da hipótese nula (H_0) admite-se a hipótese alternativa (H_A). Por outro lado, a não-rejeição de H_0 sugere que não se tome nenhuma decisão a respeito de H_A .

4.4.2 Definição da probabilidade de significância (α) para determinação da regra de decisão

A probabilidade de significância é o menor valor de α a partir do qual se torna inverosímil a validade da hipótese nula. A decisão de rejeitar ou não H_0 é tomada através da comparação estatística de teste com os respectivos valores críticos que definem as regiões de rejeição e de não rejeição da hipótese nula (Laureano, 2011).

Em um teste estatístico é calculado a probabilidade de significância (*p-value*) que corresponde ao menor nível de significância (α) em que H_0 , admitido como verdadeiro, pode ser rejeitado, isto é, representa o valor com que os dados da amostra contrariam a hipótese nula (Laureano, 2011).

Em síntese:

se $p\text{-value} \leq \alpha$ deve-se rejeitar H_0

se $p\text{-value} > \alpha$ deve-se não rejeitar H_0

Por exemplo, se *p-value* for menor ou igual a 0.1, 0.05 ou 0.01 (valores de α mais comuns em testes) então significa que se rejeita H_0 com uma probabilidade de erro pequena. Nas investigações, em geral, a probabilidade de significância assume um valor de 0.05.

Na aceitação ou rejeição da hipótese nula podem ser cometidos dois tipos de erro: erro tipo I e erro tipo II. O primeiro ocorre quando se decide rejeitar H_0 sendo esta uma hipótese verdadeira. O segundo, erro tipo II, ocorre quando se decide não rejeitar H_0 sendo esta falsa (Moraes, 2005).

Sabe-se que o valor estimado para um parâmetro da população na maioria das vezes não condiz com o valor verdadeiro, portanto, é imprescindível determinar um intervalo de confiança que gere um intervalo de valores admissíveis para o parâmetro, fundamentado nas variáveis da amostra. Um intervalo de confiança de 95% para um parâmetro populacional fornece um intervalo que possui 95% de certeza que integra o verdadeiro valor do parâmetro. Tecnicamente, 95% de todos os intervalos de confiança que são construídos abrigarão o verdadeiro valor do parâmetro, desde que todas as suposições envolvidas estejam corretas (Moraes, 2005).

Em conclusão, a finalidade principal dos procedimentos estatísticos é diminuir o nível de incerteza associada à escolha, isto é, restringir a probabilidade da escolha tomada ser errada (Laureano, 2011).

4.4.3 Identificação das principais características da amostra e da sua distribuição

Os elementos que definem a amostra são determinados de acordo com as características de medição das suas variáveis. Portanto, dependem da forma como as variáveis foram medidas (qualitativas/quantitativas), da qualidade e quantidade destas, do tipo de amostragem (probabilística ou aleatória/não-probabilística ou não-aleatória), da relação ou ausência de relação entre as variáveis (independentes/emparelhadas) e da distribuição normal das variáveis (normal/não normal).

Os tipos de variáveis e as principais características da amostra estão descritos nas secções 4.2 e 4.3, respectivamente.

A definição do tipo de teste de hipóteses, para amostras emparelhadas ou independentes, depende fundamentalmente da distribuição das variáveis da amostra, portanto, depende da normalidade dos seus dados. Para atestar se uma determinada variável é bem modelada por uma distribuição normal ou não normal são efetuados testes de normalidade, como os testes de Shapiro-Wilk e Kolmogorov-Smirnov.

As variáveis que forem determinadas como normalmente distribuídas devem ser analisadas estatisticamente por testes paramétricos, cuja metodologia exige que a forma da distribuição amostral seja conhecida. Por outro lado, as que verificarem distribuição não normal das variáveis devem ser analisadas estatisticamente por testes não-paramétricos, cuja formulação não exige conhecimento sobre a distribuição amostral (Marôco, 2014).

O fluxograma da Figura 4.1 representa o sistema de escolha do teste de hipóteses em função da distribuição das variáveis da amostra.

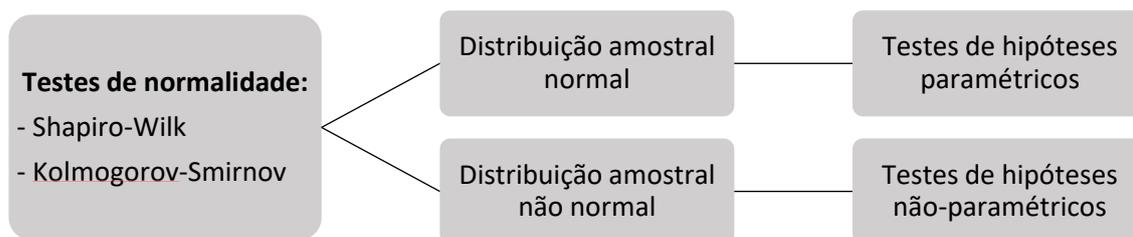


Figura 4.1 - Fluxograma representativo da escolha do teste de hipóteses em função da distribuição das variáveis da amostra.

Os testes de normalidade utilizados para atestar se a distribuição amostral é normal ou não normal e, portanto, determinar o teste de hipóteses que garanta maior confiabilidade no resultado da amostra em estudo são os testes de Shapiro-Wilk e Kolmogorov-Smirnov. Ambos podem ser calculados com recurso a *softwares* estatísticos, como o SPSS® (SPSS, 2017), obtendo-se um valor de *p-value* que determinará se a amostra segue uma distribuição normal, isto é, quando *p-value* for maior que a probabilidade de significância (α), ou não normal, quando *p-value* for menor que α .

O teste de Shapiro-Wilk deve ser preferencialmente adotado, em detrimento do teste de Kolmogorov-Smirnov, para amostras de pequena dimensão ($n < 30$) (Marôco, 2014).

4.4.4 Cálculo estatístico do teste de comparação a adotar no estudo das amostras

A escolha do tipo de teste para fazer a comparação estatística das amostras é definido de acordo com a determinação das principais características da amostra e da sua distribuição, como pode ser observado no esquema da Figura 4.1. Os testes atribuídos ao estudo da amostra são classificados em dois grupos: testes paramétricos e testes não-paramétricos.

O embasamento teórico neste âmbito, bem como nos âmbitos conexos, possuem um vasto valor explicativo para análises estatísticas de duas ou mais amostras. Não sendo o objetivo deste trabalho analisar todos esses casos, por motivos que adiante se perceberão, esse estudo se limitará à comparação estatística de duas amostras.

4.4.4.1 Testes de hipóteses paramétricos para duas amostras

Os testes para duas amostras dizem-se paramétricos quando utilizam hipóteses relativas à comparação de parâmetros de duas populações e, normalmente, quando a característica das variáveis em estudo é quantitativa. Para execução desse tipo de teste é necessário conhecer a distribuição amostral, podendo ser, normal ou não normal (a distribuição amostral normal é mais

comum) e a relação, ou ausência de relação, existente entre os elementos das amostras (independentes/emparelhadas). Para testes paramétricos de três ou mais amostras é considerável a aplicação de outras deduções para a sua execução, como a homogeneidade das variâncias (Laureano, 2011).

Os testes de hipóteses paramétricos para duas amostras abordados neste capítulo exigem que a forma da distribuição amostral seja conhecida, isto é, que a variável dependente possua distribuição amostral normal. Para duas amostras independentes os testes de hipóteses paramétricos exigem, além da distribuição amostral normal, que as variâncias populacionais sejam homogêneas.

O esquema representado da Figura 4.2 apresenta a escolha do teste estatístico mais adequado à análise de comparação entre duas amostras.

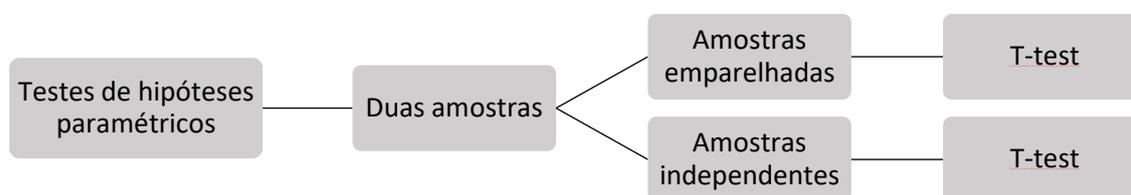


Figura 4.2 - Fluxograma representativo dos testes de hipóteses paramétricos para duas amostras.

O teste de hipótese paramétrico utilizado para validação de duas amostras emparelhadas e para validação de duas amostras independentes é o mesmo: T-test. Este tipo de teste é aplicado para ambos os tipos de amostras, assim como, para variâncias populacionais conhecidas ou não, sendo facilmente executado com o uso do *software* de estatística.

O T-test é um teste de hipótese utilizado quando se pretende testar se as médias de duas populações são ou não significativamente diferentes (Marôco, 2014).

Nas secções abaixo é discorrido sobre os testes de hipóteses paramétricos T-test, nomeadamente o T-test para duas amostras independentes e o T-test para duas amostras emparelhadas, e sobre o F-test, teste utilizado para analisar a variância de duas ou mais populações de onde foram extraídas amostras.

T-test para duas amostras independentes

O T-test para duas amostras independentes requer que as duas amostras sejam obtidas aleatoriamente de duas populações e que as variáveis dependentes possuam distribuição normal e variâncias homogêneas. As variâncias populacionais normalmente não são

conhecidas, portanto, será abordado apenas as fórmulas apropriadas para este caso (variâncias desconhecidas) (Marôco, 2014).

As hipóteses a testar para duas populações (por exemplo, A e B), onde a variável dependente Y sob estudo possui distribuição normal, são (Marôco, 2014):

$$H_0: \mu_A = \mu_B \quad vs. \quad H_1: \mu_A \neq \mu_B$$

Para variâncias populacionais não homogêneas, a estatística de teste (T) a aplicar segundo Zar é (1984, apud Marôco, 2014):

$$T = \frac{(\bar{Y}_A - \bar{Y}_B) - (\mu_A - \mu_B)}{\sqrt{\frac{S_A^2}{n_A} + \frac{S_B^2}{n_B}}} \quad (\text{Exp. 4.1})$$

Em que:

\bar{Y} - Média das variáveis da amostra.

$\mu_A - \mu_B$ - Valor da hipótese nula.

S_A - Desvio-padrão da amostra A.

S_B - Desvio-padrão da amostra B.

n_A - Tamanho da amostra A.

n_B - Tamanho da amostra B.

Para variâncias populacionais homogêneas, a estatística de teste (T) a aplicar é (Marôco, 2014):

$$T = \frac{(\bar{Y}_A - \bar{Y}_B) - (\mu_A - \mu_B)}{\hat{S} \sqrt{\frac{1}{n_A} + \frac{1}{n_B}}} \quad (\text{Exp. 4.2})$$

$$\hat{S} = \sqrt{\frac{(n_A - 1)S_A^2 + (n_B - 1)S_B^2}{n_A + n_B - 2}} \quad (\text{Exp. 4.3})$$

Em que:

\hat{S} - Desvio-padrão conjunto;

Finalmente, rejeita-se a hipótese nula se $|T| \geq t_1 - \frac{\alpha}{2}$ para um teste bilateral; $|T| \geq t_1 - \alpha$ para um teste unilateral; $|T| \geq -t_1 - \alpha$ para um teste unilateral à esquerda. A expressão $t_1 - \alpha$ representa o valor crítico de distribuição T-test no percentil $1 - \alpha$ com v graus de liberdade segundo Zar (1999, apud Marôco, 2014).

O número de graus de liberdade quando as variâncias populacionais são homogêneas é determinado pela Expressão 4.4 (Marôco, 2014).

$$v = n_A + n_B - 2 \quad (\text{Exp. 4.4})$$

T-test para duas amostras emparelhadas

A utilização do T-test para comparar estatisticamente duas amostras emparelhadas permite inferir sobre a igualdade de suas médias. Comumente cada caso é analisado duas vezes, antes e depois de um tratamento ou intervenção, resultando em pares de observações, cujas diferenças são testadas para aferir se o resultado é validado ou não, isto é, se as amostras são comparáveis ou não. Este teste requer que a variável dependente possua distribuição normal nas duas populações (Marôco, 2014).

De ressaltar que deve haver sempre correlação entre as duas amostras para se utilizar este teste. Caso não exista correlação entre as amostras em análise, ou mesmo se a correlação for muito pequena, expressa que o emparelhamento não foi útil, devendo portanto ser utilizado o T-test para amostras independentes.

As hipóteses a testar para duas amostras emparelhadas segundo Marôco (2014) são:

$H_0: \mu_1 = \mu_2$ vs. $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$ para um teste bilateral (mais comum) ou

$H_0: \mu_1 \leq \mu_2$ vs. $H_1: \mu_1 > \mu_2$ para um teste unilateral à direita ou

$H_0: \mu_1 \geq \mu_2$ vs. $H_1: \mu_1 < \mu_2$ para um teste unilateral à esquerda.

Em que:

μ_1 e μ_2 – Médias populacionais da duas medições repetidas (1 e 2).

O modo mais simples de calcular a estatística de teste começa com o cálculo de uma variável auxiliar $D_i = (X_{1i} - X_{2i})$. As hipóteses então podem ser escritas de forma equivalente (Marôco, 2014):

$$H_0: \mu_D = 0 \quad \text{vs.} \quad H_1: \mu_D \neq, >, < 0$$

Assim, a estatística de teste (T) é (Marôco, 2014):

$$T = \frac{\bar{D} - \mu_D}{\frac{S_D}{\sqrt{n}}} \quad (\text{Exp. 4.5})$$

Em que:

\bar{D} – Média da variável D_i ;

S_D – Desvio-padrão da variável D_i ;

n – Tamanho da amostra.

Por fim, rejeita-se a hipótese nula se $|T| \geq t_1 - \frac{\alpha}{2}$ para um teste bilateral; $|T| \geq t_1 - \alpha$ para um teste unilateral à direita; $|T| \geq -t_1 - \alpha$ para um teste unilateral à esquerda. A expressão $t_1 - \alpha$ representa o valor crítico de distribuição T-test no percentil $1 - \alpha$ com $(n - 1)$ graus de liberdade (Marôco, 2014).

F-test

O F-test, mais conhecido como análise de variância (ANOVA), é um teste utilizado para comparar médias de duas ou mais populações de onde foram recolhidas amostras independentes e aleatórias, desde que a distribuição da variável em estudo seja normal e as variâncias populacionais sejam homogêneas (Marôco, 2014).

O F-test compara a variância dentro das amostras ou grupos (variância residual) com a variância entre as amostras ou grupos (variância do fator). A variância residual está associada à variabilidade natural entre os sujeitos, ao registo, erros de medida, etc. A variância do fator está associada ao efeito do fator sob estudo (Marôco, 2014).

Quando a variância residual for consideravelmente inferior à variância do fator, o efeito do fator sobre a variância da variável dependente também será consideravelmente maior à variância residual dos sujeitos. Portanto, o fator tem um efeito significativo sobre a variação da variável dependente. Então podemos afirmar que as médias populacionais estimadas através das amostras, vão estar significativamente distantes entre si, concluindo que pelo menos duas médias populacionais são significativamente diferentes (Marôco, 2014).

O contrário ocorre quando a variância do fator for significativamente inferior à variância residual. Neste caso, o fator não tem um efeito estatisticamente significativo sobre a variação da variável dependente e as médias populacionais não serão significativamente diferentes (Marôco, 2014).

Se existir apenas uma variável independente, isto é, um fator a análise da variância designa-se por ANOVA *one-way*. Se existir mais do que uma variável independente a análise da variância designa-se por ANOVA fatorial. A ANOVA divide-se em três níveis do fator (tipo I, tipo II e tipo

III) de acordo com as observações da variável independente: níveis do(s) fator(es) fixados à partida pelo investigador designa-se ANOVA tipo I; níveis do(s) fator(es) não fixados à partida pelo investigador, mas selecionados aleatoriamente de uma população de níveis do fator, designa-se ANOVA tipo II; níveis do(s) fator(es) fixados à partida pelo investigador e outro(s) aleatoriamente designa-se ANOVA tipo III (Marôco, 2014).

Para casos onde as amostras não são independentes (por exemplo, para comparação de duas médias populacionais a partir de amostras emparelhadas) o F-test pode efetuar-se por recurso a uma ANOVA de medições repetidas (para amostras de medições repetidas) ou por uma ANOVA em blocos (podendo ser completa ou incompletamente casualizados) (Marôco, 2014).

4.4.4.2 Testes de hipóteses não-paramétricos para duas amostras

Os testes de hipóteses não-paramétricos são considerados comumente como uma alternativa aos testes paramétricos quando estes se encontram em condições não favoráveis a sua aplicação, especificamente, devido à normalidade da variável (distribuição não normal) em estudo e à homogeneidade de variâncias entre grupos. Esse tipo de teste não requisita uma distribuição amostral conhecida (Marôco, 2014).

Os testes não-paramétricos são menos potentes que os testes paramétricos quando se analisa amostras de grande e igual dimensão, mas para amostras pequenas e com diferentes dimensões esse tipo de teste torna-se mais potente que os testes paramétricos. Além disso, são testes mais acessíveis, visto que podem ser aplicados em variáveis com escala pelo menos ordinal (Marôco, 2014).

A comparação estatística com recurso a testes de hipóteses não-paramétricos de duas amostras podem ser aplicados a amostras emparelhadas ou amostras independentes. Essa característica determinará qual o teste mais adequado à análise estatística em questão, portanto, determinará se as duas amostras em estudo são equivalentes.

O fluxograma representado da Figura 4.3 apresenta o fluxo de escolha do teste de hipóteses não-paramétrico mais adequado para a análise de comparação entre duas amostras.

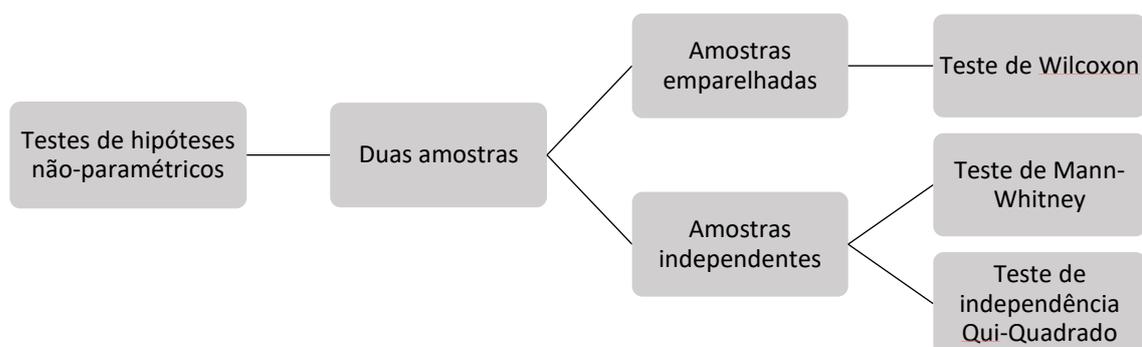


Figura 4.3 - Fluxograma representativo dos testes de hipóteses não-paramétricos para comparação de duas amostras.

O teste não-paramétrico utilizado para validação de duas amostras emparelhadas é o Teste de Wilcoxon, enquanto os testes não-paramétricos utilizados para comparação estatística de duas amostras independentes são o Teste de Mann-Whitney e o Teste de Independência Qui-Quadrado.

Nas secções abaixo é discorre-se sobre os tipos de testes de hipóteses não-paramétricos para comparação de duas amostras, nomeadamente o Teste de Wilcoxon, o Teste de Mann-Whitney e o Teste de Independência Qui-Quadrado.

Teste de Wilcoxon para duas amostras emparelhadas

O teste de Wilcoxon é utilizado para avaliar a significância da diferença entre duas amostras emparelhadas, portanto, as amostras são emparelhadas e a variável dependente é medida numa escala ordinal (Marôco, 2014).

O teste de Wilcoxon para duas amostras emparelhadas permite formular hipóteses sobre a distribuição $F(X)$ da variável X em duas populações genéricas 1 e 2 de onde foram retiradas as amostras emparelhadas. As hipóteses estatísticas podem escrever-se para um teste bilateral, para um teste unilateral à direita, unilateral à esquerda e, caso as funções de distribuição forem idênticas, podem escrever-se também com as medianas populacionais (Marôco, 2014).

O procedimento de cálculo estatístico para esse tipo de teste inicia-se com o cálculo de uma variável auxiliar $D_i = X_{1i} - X_{2i}$. Os valores de D_i são ordenados, por ordem crescente, de modo a eliminar os valores com $D_i = 0$. No caso de existirem observações empatadas, isto é, observações com o mesmo valor de D_i , assume-se a média das ordens que essas observações teriam se não fossem de mesmo valor. Em seguida são calculadas as estatísticas S^+ e S^- por soma das ordens com $D_i > 0$ (positivo) e $D_i < 0$ (negativo) (Marôco, 2014).

Os *softwares* de estatística permitem calcular o *p-value* para a estatística referente aos sinais positivos e negativos, onde n^+ e n^- são o número de sinais positivos e o número de sinais negativos, respectivamente (Marôco, 2014). Uma vez obtido o *p-value* é feita a análise do resultado, onde, rejeita-se a hipótese nula quando $p\text{-value} \leq \alpha$ (nível de significância).

Teste de Mann-Whitney para comparar amostras independentes

O teste de Mann-Whitney é utilizado para comparar duas amostras não-paramétricas. Deve verificar-se se as amostras em análise pertencem ou não à mesma população. Efetivamente, verifica-se se há indícios para afirmar que valores de um grupo X são superiores a valores de um grupo Y . O teste de Mann-Whitney (U) pode ser considerado a versão não-paramétrica do T-test, para amostras independentes (INE, 2012).

Ao contrário do T-test, que testa a igualdade das médias, o teste de Mann-Whitney testa a igualdade das medianas. Os valores de U calculados pelo teste avaliam o grau de interação das variáveis das duas amostras após ordenação crescente. A maior separação das variáveis em

conjunto indica que as amostras são distintas, rejeitando-se a hipótese de igualdade das medianas (INE, 2012).

No seguimento, é calculado a estatística de teste para obter o *p-value* a partir da distribuição amostral dessa estatística sob a hipótese nula. A diferença é que ao invés de fazer a análise estatística com as variáveis originais da amostra, faz-se com as variáveis ordenadas. A vantagem é que as suposições de normalidade e homogeneidade das variâncias não são necessárias para esse teste, gerando resultados mais globais. Além disso, o teste de Mann-Whitney pode ser aplicado em uma variável que seja originalmente ordinal, enquanto o T-test requer uma escala ao menos intervalar (INE, 2012).

De acordo com o Departamento de Informática e Estatística (2012), o teste de Mann-Whitney é calculado da seguinte forma:

- É composto um conjunto W, com todas as variáveis das duas amostras (X e Y);
- O conjunto W é ordenado por ordem crescente;
- Aponta-se a ordem de cada elemento deste conjunto;
- Separam-se novamente as amostras X e Y;
- O valor de U é a soma das ordens da amostra X.

Quanto mais baixo for o valor calculado de U, maior será a evidência de que as populações são diferentes, uma vez que U é a soma das ordens, portanto seu valor deve ser baixo se na categoria X estiverem as primeiras variáveis da ordem (obviamente em Y estarão as variáveis de ordem superior). Logo, neste caso se evidencia uma diferença entre as populações (INE, 2012).

Se as diferenças entre as situações forem aleatórias, como é suposto por H_0 , então os resultados devem ser aproximadamente os mesmos e, portanto, as ordens devem ser também aproximadamente as mesmas para as duas situações. Se houver uma preponderância de ordens altas ou baixas numa situação ou na outra, então é porque a diferença no total dos resultados ordenados para cada situação é devida aos efeitos previstos da variável independente e não ao acaso (INE, 2012).

Teste de independência Qui-Quadrado

O teste de independência do Qui-Quadrado (χ^2) é utilizado para testar se duas ou mais amostras independentes diferem relativamente a uma determinada característica. As variáveis deste tipo de teste organizam-se comumente em tabelas de frequências absolutas, chamadas tabelas de contingência (Marôco, 2014).

De acordo com Marôco (2014), pretende-se testar:

H_0 : A distribuição das contagens pelas amostras independe da variável

H_A : A distribuição das contagens pelas amostras não independe da variável

A comparação estatística desse teste é dado segundo Siegel & Castellan por (1988, apud Marôco, 2014):

$$X^2 = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^C \frac{(O_{ij} - E_{ij})^2}{E_{ij}} \quad (\text{Exp. 4.6})$$

Em que:

X^2 – Valor estatístico que estima a distância relativa entre as frequências observadas em cada célula da tabela de contingência (O_{ij}) e as frequências que se esperaria obter se a hipótese nula fosse verdadeira (E_{ij}).

C - Número de colunas da tabela de contingência.

L - Número de linhas da tabela de contingência.

O_{ij} - Frequência real da i -ésima linha, j -ésima coluna.

E_{ij} - Frequência esperada da i -ésima linha, j -ésima coluna.

As frequências esperadas são dadas segundo Marôco (2014) pela Expressão 4.7.

$$E_{ij} = \frac{L_i \times C_j}{N} \quad (\text{Exp. 4.7})$$

Onde,

$$L_i = \sum_{j=1}^C O_{ij} \quad C_i = \sum_{j=1}^L O_{ij} \quad (\text{Exp. 4.8 e Exp. 4.9})$$

Em que:

L_i – Número total de linhas.

C_i - Número total de colunas.

N – Tamanho da amostra.

O X^2 calculado na Expressão 4.1 aproxima-se de um χ^2 com $(C - 1)(L - 1)$ graus de liberdade. Logo, para um determinado nível de significância (α) rejeitamos a hipótese nula (H_0) se $X^2 \geq \chi^2_{1-\alpha; (C-1)(L-1)}$. A probabilidade de significância é dada pelo valor de α no qual $X^2 \geq \chi^2_{1-\alpha; (C-1)(L-1)}$. Este valor pode ser encontrado nas tabelas do χ^2 ou através da função inversa da função da densidade de probabilidade acumulada do χ^2 (Marôco, 2014).

4.4.5 Determinação da validade ou não da amostra

Posteriormente à execução das quatro etapas anteriores, a comparação estatística determinará, através dos valores de p (*p-value*), obtidos pelos resultados dos testes de hipóteses, se a amostra é válida ou não válida, isto é, se os dados das duas amostras são equivalentes ou não equivalentes.

Como já referido, geralmente o nível de significância (α) utilizado é de 0.05, portanto, as amostras que apresentarem $p\text{-value} < \alpha$ (0.05) possuem incompatibilidade entre seus dados, resultando na sua não validação. O contrário ocorre para amostras que apresentarem $p\text{-value} > \alpha$ (0.05), que traduz compatibilidade entre seus dados, resultando na sua validação.

5 Caso de Estudo

5.1 Introdução

A base de dados é uma componente essencial dum Sistema de Gestão de Pavimentos Aeroportuários (SGPA), portanto, os dados inseridos e organizados nesta componente devem ser de qualidade, de modo a permitir sustentar a identificação de deficiências e diagnosticar adequadamente o estado do pavimento, detectar as necessidades de manutenção atuais e futuras e prever os efeitos das estratégias de intervenção sobre os pavimentos ao longo da sua vida útil. O levantamento do estado da superfície dos pavimentos das infraestruturas aeroportuárias vem se tornando uma atividade cada vez mais dispendiosa dado as limitações operacionais relativas ao tempo de acesso aos pavimentos com tráfego significativo e às restrições nos recursos humanos e financeiros disponibilizados para execução deste tipo de levantamento (Keegan, et al., 2014). Consequentemente, a escolha do método de recolha de dados que fornecerá as informações necessárias para avaliar o estado dos pavimentos é fundamental para o sucesso do SGPA.

Tendo em conta os aspetos anteriormente mencionados, no presente capítulo é desenvolvido um estudo de caso, que analisa os dados de uma abordagem inovadora, rápida e de baixo custo, para inspeção de degradações superficiais em pavimentos aeroportuários. O estudo é desenvolvido utilizando os dados (variáveis) recolhidos por Lima (2016) no levantamento do estado do pavimento da pista principal do Aeroporto Internacional Amílcar Cabral (Ilha do Sal – Cabo Verde), pelos métodos de auscultação tradicional a pé e em veículo equipado com dispositivos de varrimento laser e de captação e gravação de imagem e georreferenciação. O método inovador de auscultação de pavimentos aeroportuários em veículo foi desenvolvido nos últimos 4 anos a partir do trabalho de investigação desenvolvido no Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura da Universidade da Beira Interior (UBI) (Maganinho, 2013) (Nogueira, 2015) (Lima, 2016) (Domingos, 2017) (Feitosa, et al., 2019) (Lima, et al., 2020).

A fim de validar o método de inspeção proposto e desenvolvido na UBI, as duas abordagens (a pé e em veículo) são analisadas por meio de uma análise de comparação estatística dos dados recolhidos sobre as degradações dos pavimentos, nomeadamente, referentes ao tipo, níveis de gravidade e densidades. Além disso, o índice numérico PCI obtido por Débora Lima (2016) para ambos os métodos também é comparado.

A verificação de diferenças estatisticamente não significativas dos resultados obtidos na análise estatística de comparação podem validar o método proposto, que, à partida, aparenta ser uma metodologia mais prática, já que requer menos tempo e recursos do que o levantamento realizado a pé, sem o auxílio de aparelhagem técnica especializada.

5.2 Sistema móvel multifuncional de baixo custo

O sistema móvel multifuncional de baixo custo com processamento semiautomático de dados, desenvolvido no Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura da Universidade da Beira Interior (DECA-UBI), constitui uma solução tecnológica económica para o levantamento de dados de degradações superficiais de pavimentos aeroportuários. O sistema é constituído por um veículo equipado com dispositivos de varrimento laser e de captação e registo de dados de imagem e de georreferenciação. O sistema foi desenvolvido tendo como base estudos e 2 protótipos desenvolvidos no Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura da Universidade da Beira Interior (DECA-UBI) para auscultação de degradações em ambiente rodoviário (Maganinho, 2013) (Nogueira, 2015) (Lima, et al., 2019).

A Figura 5.1 ilustra o sistema móvel multifuncional de baixo custo e seus equipamentos.



Figura 5.1 - Equipamentos usados no sistema móvel multifuncional de baixo custo desenvolvido no DECA-UBI (Lima, 2016).

O sistema é constituído pelos seguintes equipamentos (Lima, 2016):

- 1 estrutura metálica capaz de ser instalada na carroçaria de um veículo para adequação do equipamento de captação de imagem;
- 1 câmara de vídeo *Garmin Elite* com georeferenciação para captação da imagem;
- 2 feixes laser de 20 mW, instalados na superfície superior traseira do veículo, posicionados longitudinal e transversalmente ao sentido de marcha do mesmo, de modo que fiquem centralizados em relação à câmara;
- 2 receptor GPS Dupla Banda (Trimble 4000SSi), utilizados em modo de pós-processamento ou *precise-point-positioning* (PPP). Um dos receptores é instalado no tejadilho do veículo de inspeção, para levantamento cinemático de dados de georeferenciação que posteriormente podem ser processados contra as observações do receptor em modo estático, servindo de referência para a recolha de dados durante o levantamento (ver Figura 5.1), ou opcionalmente processados em PPP num serviço gratuito online;
- 1 receptor de GPS GIS (Trimble GeoXT), utilizado para o levantamento estático rápido de referências na pista;
- 1 receptor de GPS *Garmin 17N*, utilizado para sincronismo temporal entre a câmara HD e o computador portátil;
- 1 computador portátil, utilizado para registo e verificação rápida da trajetória dentro dos corredores de levantamento;
- 1 veículo do tipo *pick up*.

Todas as degradações superficiais dos pavimentos flexíveis são identificadas por visualização do registo de imagem. No período noturno a deformação da projeção dos feixes laser observadas no registo de imagem possibilitam identificar as degradações do tipo rodeiras, empolamento, ondulação e depressões. As demais degradações são identificadas por visualização direta do registo de imagem no período diurno, nomeadamente, pele de crocodilo, exsudação, fendas cruzadas, erosão “*jet-blast*”, fendas de reflexão, polimento de agregados, fendas longitudinais e transversais, derrame de óleo e outros solventes, escorregamento lateral, reparações e cortes técnicos, desagregação superficial dos agregados, fendas em “meia-lua” e desagregação superficial do mástique (Maganinho, 2013) (Lima, 2016) (Domingos, 2017).

Os levantamentos diurnos e noturnos com recurso a esta solução de levantamento são efetuados segundo a seguinte sequência de atividades (Lima, 2016):

- Montagem do GPS estático e verificação do registo de dados;
- Montagem do equipamento na estrutura e fixação da estrutura no veículo;
- Verificação da amplitude da imagem captada e do funcionamento dos receptores GPS;
- Verificação do sistema de feixes laser para a inspeção no período noturno;

- Localização *in situ* dos limites e do ponto médio da largura dos corredores de levantamento;
- Alinhamento do veículo com o ponto médio do corredor a inspecionar;
- Verificação da ligação dos equipamentos ao computador portátil para o registo e armazenamento dos dados de georreferenciação e imagem;
- Levantamento das degradações existentes em cada corredor.

A auscultação dos pavimentos com o sistema proposto possibilita recolher um conjunto de informações, dados de georreferenciação e imagens, que depois são inseridas num SIG, permitindo a visualização e análise da superfície do pavimento (Domingos, 2017).

Segundo Lima (2016), entre as vantagens apresentadas por esse método de levantamento de degradações da superfície do pavimento estão a redução do tempo necessário para recolher as informações sobre as degradações do pavimento (quando comparado ao levantamento a pé, que é mais demorado e torna-se assim mais dispendioso para aeroportos maiores e com tráfego constante) e a possibilidade oferecida de realizar o levantamento do estado de toda a superfície do pavimento de forma rápida e contínua. O caso de estudo do presente trabalho demorou cerca de 3 semanas para efetuar o levantamento tradicional a pé das unidades de amostras selecionadas para estudo (43 unidades de amostras), enquanto que toda a pista foi inspecionada em 3 dias com o sistema multifuncional proposto.

Outra vantagem desse método é a possibilidade de processar todas as informações em gabinete através da visualização dos dados no sistema SIG, permitindo a confirmação, se necessário, dos dados obtidos relativos às degradações do pavimento nas mesmas condições que as verificadas no momento do levantamento (registo de imagem). Com essa abordagem, ainda é possível comparar no sistema SIG os dados alfanuméricos e de imagem de vários levantamentos realizados ao longo da vida útil do pavimento, apoiando estudos de tendência do estado dos pavimentos (Lima, 2016).

Como desvantagens, Lima (2016) aponta a impossibilidade de identificar as degradações da superfície do pavimento e seus respectivos níveis de gravidade por visualização direta, como no levantamento a pé, além da dificuldade para distinção e avaliação do nível de gravidade das degradações do tipo desagregação superficial do mástique e desagregação superficial do agregado, devido a qualidade de imagem que não deixa clara a identificação da profundidade ou rugosidade da textura da superfície do pavimento.

5.3 Localização geográfica

A República de Cabo Verde é um país composto de ilhas, situado no Oceano Atlântico, entre as latitudes 14° 23' e 17° 12' Norte e as longitudes 22° 40' e 25° 22' Oeste, aproximadamente a 450 km da costa ocidental Africana. O arquipélago é constituído por 10 ilhas das quais 9 são habitadas, possuindo uma superfície de território de 4033 km² (Lima, 2016), como configura a Figura 5.2.

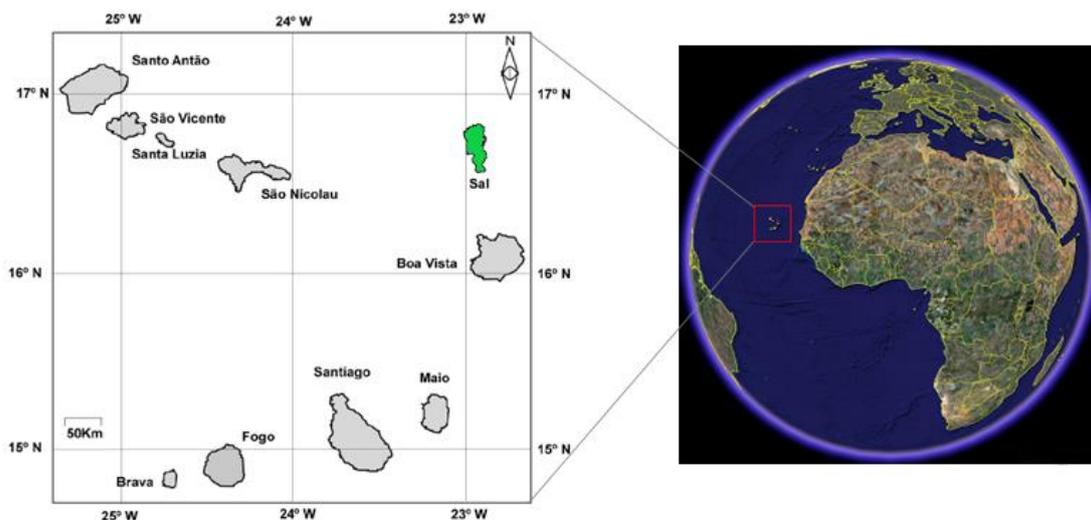


Figura 5.2 - Localização geográfica da República de Cabo Verde.

Devido à principal atividade da ilha ser o turismo, o sistema aeroportuário de Cabo Verde é o principal impulsionador da economia do país, que conta com quatro aeroportos e três aeródromos. Além disso, a própria geografia do território contribui para a crescente importância do transporte aéreo no país, pois questões como a acessibilidade entre as ilhas e destas com outros países tornam-se primordiais para o desenvolvimento económico e a atividade social da população (Lima, et al., 2017).

A construção do Aeroporto Internacional Amílcar Cabral iniciou em 1939 e tornou-se uma instalação totalmente operacional em 1949 (Almeida, 2016). É o primeiro e maior aeroporto internacional do país, o que justifica a implementação de um SGPA com maior eficácia na componente “Levantamento do estado dos pavimentos” (ver Figura 5.3). De acordo com o *Aeronautical Information Publication* (AIP), o aeroporto localiza-se a cerca de três quilômetros a sul da cidade de Espargos, na Ilha do Sal, e possui dois códigos de identificação: SID segundo a *International Air Transport Association* (IATA) e GVAC segundo a *International Civil Aviation Organization* (ICAO). Possui um Terminal de Passageiros com capacidade para receber cerca de 700 passageiros por hora em operações mistas de chegadas e partidas (Silva, 2013) (Lima, 2016).

O AIAC possui categoria 9 em termos de salvamento e combate de incêndios. Determinada pela classificação ICAO (2013) a partir do comprimento total (maior ou igual a 61 m e menor que 76 m, para categoria 9) e largura máxima de fuselagem (7 m, para categoria 9) dos aviões mais longos recebidos pelo aeroporto. Em termos de capacidade, o aeroporto pode receber aeronaves do tipo 4E, de acordo com a classificação ICAO (2013). O primeiro elemento do código é um número baseado no comprimento do campo de referência (4 – maior ou igual a 1 800 m) do maior avião que o aeroporto recebe e o segundo elemento é uma letra baseada na envergadura da asa deste (E - maior ou igual a 52 m e menor que 65 m) e no vão exterior da roda de engrenagem principal (E - maior ou igual a 9 m e menor que 14 m). Possui como sistemas de ajuda à navegação, *Very high*

Frequency Omnidirectional Radio Range (VOR), o *Glide* e o *Instrument Landing System (ILS)* (*Antena Localizer*) (Lima, 2016).



Figura 5.3 - Localização do Aeroporto Internacional Amílcar Cabral, Ilha do Sal, Cabo Verde.

O aeroporto possui duas pistas: a pista principal 01-19 e a pista 07-25 que se encontra inativa. A pista principal é constituída por pavimento flexível. A capacidade de suporte do solo de fundação da pista é elevada e o valor máximo de pressão permitida pelos pneus ilimitada, resultando no *Pavement Classification Number (PCN)* 58/F/A/W/T. A pista 01-19 do AIAC tem 45 m de largura por 3000 m de comprimento, com bermas de 7,5 m de largura (Lima, 2016).

No Aeroporto Internacional Amílcar Cabral existem 4 caminhos de circulação de aeronaves em pavimento flexível que permitem unir as plataformas de estacionamento e a pista, bem como, garantir que as aeronaves saiam mais rapidamente da pista após a aterragem. A plataforma de estacionamento agrega 5 *stands* em pavimento rígido que podem ser utilizadas em configuração mista (Lima, 2016).

Não foi encontrado nenhum registo renovações do pavimento da pista 01-19. De acordo com Lima (2016), na dissertação intitulada “Sistema de Gestão de Pavimentos Aeroportuários para Cabo Verde”, as únicas informações obtidas foram relatos de intervenções feitas no ano de 1987 sem informações específicas sobre as atividades realizadas.

A Figura 5.4 ilustra a planta do "Lado Ar" do Aeroporto Internacional Amílcar Cabral (ver também Anexo I).

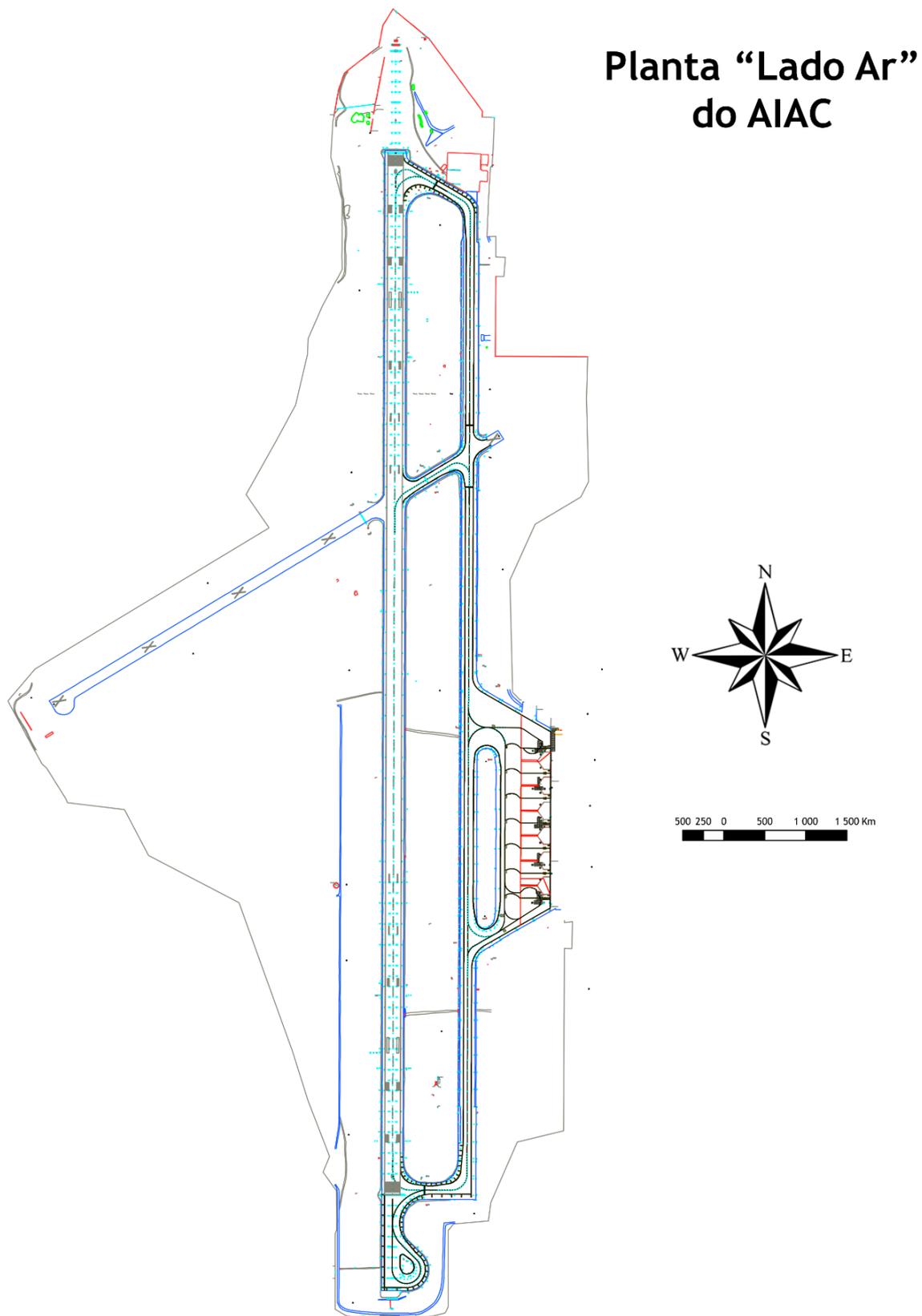


Figura 5.4 - Planta do "Lado Ar" do AIAC (adaptado de Lima, 2016).

5.4 Segmentação da pista

A pista principal do AIAC foi dividida em ramos, secções e unidades de amostra para fazer o levantamento das degradações superficiais e possibilitar a avaliação do estado da rede de pavimentos pela determinação do índice PCI. A segmentação e o cálculo de PCI foram executados por Lima (2016) de acordo com a norma ASTM D5340-12 (2012).

A Tabela 5.1 resume as informações de codificação e segmentação adotadas para a pista 01-19.

Tabela 5.1 - Codificação e segmentação da pista 01-19 do AIAC (adaptado de Lima, 2016).

Pavimento	Código	Descrição / Comentários
Rede de Pavimentos – Aeroporto	SID	Rede de pavimentos do AIAC
Ramos do Pavimento	RO1 TWY BER APR	Pista principal (01-19) Caminhos de circulação Bermas Placas de Estacionamento
Secções do pavimento RO1	A B C	900 m medidos a partir da cabeceira 01 (área de aterragem) 1200 m localizado na parte central da pista 900 m medidos a partir da cabeceira 19 (área de aterragem)
Unidades de amostra do pavimento – área total da pista (segmentação efetuada de acordo com a norma ASTM D5340-12)	A: 81 unidades de amostra B: 108 unidades de amostra C: 81 unidades de amostra	Unidades de amostra de 500 m ² (100 m por 5 m) Levantamento visual em veículo equipado de baixo custo
Unidades de amostra do pavimento – amostra para inspeção (mínimo a inspecionar de acordo com a norma ASTM D5340-12)	A: 14 unidades de amostra B: 15 unidades de amostra C: 14 unidades de amostra	Unidades de amostra de 500 m ² (100 m por 5 m) Levantamento visual tradicional a pé e em veículo

Desta forma, a rede SID encontra-se dividida de acordo com a norma ASTM D5340-12 (2012) em 4 ramos, 16 secções (das quais 3 correspondem à pista 01-19) e 270 unidades de amostra, das quais, 43 (número mínimo de unidades de amostras necessárias para que o estudo do estado do pavimento seja estatisticamente significativo) foram levantados a pé e com recurso a veículo equipado com dispositivos de varrimento laser e de captação e gravação de dados de imagem e georreferenciação. Para facilitar o levantamento das degradações superficiais a equipe de inspeção optou por dividir a pista numa malha de 9 corredores, de 5 m de largura por 100 m de

comprimento, por conseguinte, cada unidade de amostra inspecionada possui uma área de 500 m² (Lima, 2016).

A segmentação do Aeroporto Internacional Amílcar Cabral pode ser consultada no Anexo II deste documento.

Vale ressaltar que o sistema móvel multifuncional de baixo custo proposto fez o levantamento de toda a superfície do pavimento (270 unidades de amostra), enquanto o método tradicional a pé inspecionou apenas as 43 unidades de amostras mínimas que foram utilizadas para realização da análise estatística. O levantamento a pé das 43 unidades de amostras foi realizado em 3 semanas, enquanto o levantamento de toda a superfície do pavimento (incluindo, portanto, neste último caso, as 43 unidades de amostra inspecionadas a pé e usadas no caso de estudo) com recurso a veículo equipado foi realizado em 3 dias.

A Tabela 5.2 apresenta os resultados da segmentação do ramo R01 (*Runway*) correspondente à pista principal 01-19 para cada uma das secções consideradas (A, B e C).

No Anexo III figura a carta com a localização das unidades de amostra inspecionadas.

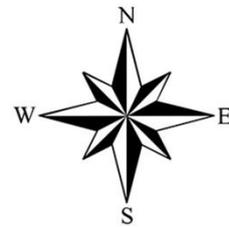
Tabela 5.2 - Número de unidades de amostra por secção.

Ramo	Secções	Área [m²]	Nº de unidades de amostra	Nº mínimo de unidades de amostra a inspecionar	Espaçamento entre unidades de amostra
R01	A	40 500	81	14	5
	B	54 000	108	15	7
	C	40 500	81	14	5

A Figura 5.5 apresenta a segmentação da pista 01-19 do Aeroporto Internacional Amílcar Cabral. A numeração das unidades de amostra de parte da secção A é ilustrada na Figura 5.6, de modo a exemplificar a forma como foi efetuada a segmentação da pista. As unidades de amostra da secção foram numeradas consoante a orientação da pista, de baixo para cima e da esquerda para direita.



Segmentação do AIAC



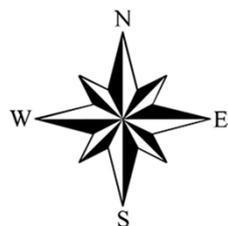
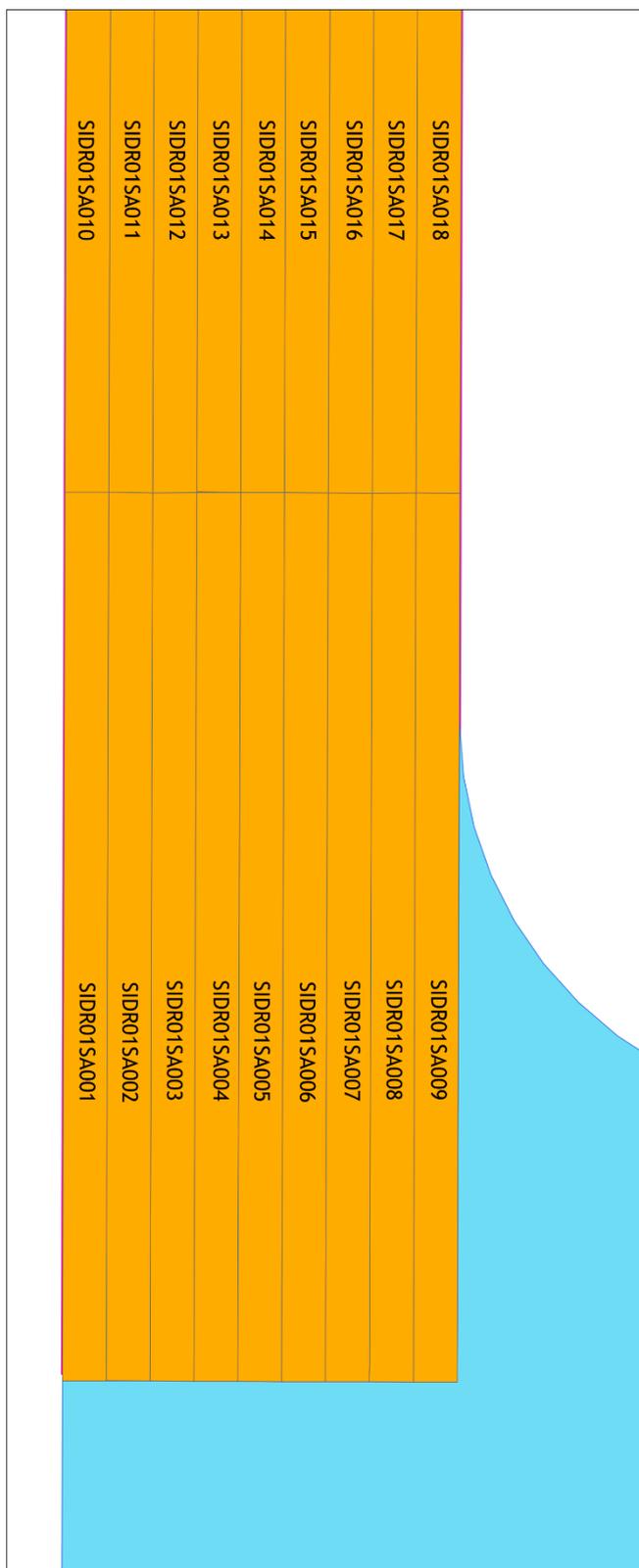
0 100 200 400 600 800 Metros

Legenda:

-  Secção A - SIDR01SA
-  Secção B - SIDR01SB
-  Secção C - SIDR01SC
-  Apron - SIDAPR
-  Runway - SIDR01
-  Taxiway - SIDTWY

Figura 5.5 - Segmentação da pista principal do Aeroporto Internacional Amílcar Cabral (Lima, 2016).

Numeração das unidades de amostra Secção A



10 5 0 10 Metros

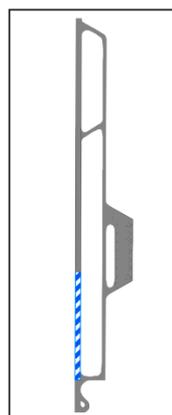


Figura 5.6 - Numeração das unidades de amostra de parte da secção A (Lima, 2016).

5.5 Auscultação dos pavimentos

A auscultação dos pavimentos foi feita por levantamento visual tradicional a pé e com recurso a veículo equipado com dispositivos de varrimento laser e de captação e registo de dados de imagem e de georreferenciação.

A informação obtida através da auscultação do pavimento da pista 01-19 permitiu identificar as degradações superficiais existentes e avaliar sua qualidade pela determinação do índice global PCI. Toda a informação recolhida e produzida foi organizada e introduzida numa base de dados (módulo central do SGPA), o que permitiu o estudo comparativo dos dados referentes aos dois métodos de auscultação.

5.5.1 Levantamento visual tradicional (a pé)

O levantamento visual tradicional foi executado na Pista 01-19 do AIAC segundo a descrição apresentada na secção 3.3.1, em quatro etapas.

Para sua execução foi utilizado o catálogo de degradações de pavimentos flexíveis da norma ASTM D5340-12 como auxílio para identificação das degradações existentes na Pista 01-19. Este catálogo considera um total de 17 degradações diferentes para avaliação do estado do pavimento, como apresentado na secção 3.2. A partir do levantamento efetuado foram identificadas 6 degradações diferentes no pavimento da pista 01-19: pele de crocodilo, depressões, fendas longitudinais e transversais (exceto fendas devido a existência de juntas de pavimentos rígidos), reparações e cortes técnicos, desagregação superficial do agregado e desagregação superficial do mástique em misturas betuminosas densas.

Os dados obtidos através do levantamento visual tradicional foram tratados, organizados e introduzidos na base de dados do Sistema de Gestão de Pavimentos Aeroportuários. A Figura 5.7 apresenta um exemplo de folha de registo de dados de levantamento do estado do pavimento para uma unidade de amostra inspecionada.

FOLHA DE LEVANTAMENTO DO ESTADO DE PAVIMENTO FLEXÍVEL PARA UMA UNIDADE DE AMOSTRA								Esboço:			
Ramo: RWY		Secção: A		Unidade de amostra: 050							
Data: 7/8/2016		Técnico: Débora Lima									
Área da unidade de amostra: 500 [m²]											
TIPO DE DEGRADAÇÃO:	N.G.	QUANTIDADE				OBS:	TOTAL	DENSIDADE [%]	VALOR DEDUZIDO	VALOR DEDUZIDO POR ORDEM	
1. Pele de crocodilo (Alligator or fatigue cracking)	L						0,0	0,0		56,5	
	M	28,0	24				52,0	10,4	56,5	19,8	
	H						0,0	0,0		4,5	
2. Exsudação (Bleeding)							0,0	0,0			
3. Bloco cruzadas (formando blocos) (Block cracking)	L						0,0	0,0			
	M						0,0	0,0			
	H						0,0	0,0			
4. Ondulação (Corrugation)	L						0,0	0,0			
	M						0,0	0,0			
	H						0,0	0,0			
5. Depressões (Depression)	L						0,0	0,0			
	M						0,0	0,0			
	H						0,0	0,0			
6. Erosão por "Jet-Blast" (Jet-blast erosion)							0,0	0,0			
7. Fendas de reflexão no local das juntas de pavimentos rígidos (longitudinal e transversais) (Joint reflection cracking from PCC)	L						0,0	0,0			
	M						0,0	0,0			
	H						0,0	0,0			
8. Fendas Longitudinais e transversais (Excluindo as fendas devidas à existência de juntas de pavimentos rígidos) (longitudinal and transverse cracking (non-pcc joint reflective))	L						0,0	0,0			
	M						0,0	0,0			
	H						0,0	0,0			
9. Derrame de óleo, combustível ou outros solventes (oil spillage)							0,0	0,0			
10. Reparações e cortes técnicos (patching and utility cut patch)	L						0,0	0,0			
	M						0,0	0,0			
	H	6,5					6,5	1,3	19,8		
11. Polimento de agregados (Polished Aggregate)							0,0	0,0			
12. Desagregação superficial do agregado (Raveling)	L						0,0	0,0			
	M						0,0	0,0			
	H						0,0	0,0			
13. Rodeiras (Rutting)	L						0,0	0,0			
	M						0,0	0,0			
	H						0,0	0,0			
14. Escorregamento lateral devido à existência de lajes rígidas (Shoving of asphalt pavement by PCC slabs)	L						0,0	0,0			
	M						0,0	0,0			
	H						0,0	0,0			
15. Fendas em forma de "meia-lua" (Slippage cracking)	L						0,0	0,0			
	M						0,0	0,0			
	H						0,0	0,0			
16. Empolamento (Swell-distress)	L						0,0	0,0			
	M						0,0	0,0			
	H						0,0	0,0			
17. Degradação superficial do mástico (em misturas betuminosas densas) [Weathering (surfasse wear)-Dense mix asphalt]	L	112,0					112,0	22,4	4,5		
	M						0,0	0,0			
	H						0,0	0,0			

Figura 5.7 - Folha de registo de dados de levantamento do estado de pavimentos flexíveis para uma unidade de amostra inspecionada (Lima, 2016).

5.5.2 Levantamento em veículo equipado com dispositivos de varrimento laser e de captação e registo de dados de imagem e georreferenciação

O recurso a um veículo equipado para efetuar a auscultação teve como finalidade inovar no sistema de auscultação das degradações superficiais existentes nos pavimentos flexíveis aeroportuários. Este método de auscultação inovador apresenta, uma metodologia mais prática, rápida e de baixo custo, já que requer menos tempo e recursos financeiros e humanos do que o levantamento tradicional realizado a pé. A descrição, desenvolvimento e características desse sistema móvel multifuncional de baixo custo é apresentada na secção 5.2.

Este método de levantamento foi executado com a câmara de vídeo programada para captar duas imagens por segundo, tendo sido instalada a uma altura de imagem na direção vertical de 3 m para permitir uma amplitude de captação de pelo menos 6 m. Foram realizadas duas campanhas de levantamento, uma no período noturno, já que confere melhor visualização da projeção dos feixes laser no pavimento, para o levantamento das degradações do tipo rodeiras, empolamento, ondulação e depressões, e outra no período diurno para levantamento das demais degradações (pele de crocodilo, exsudação, fendas cruzadas, erosão “*jet-blast*”, fendas de reflexão, polimento de agregados, fendas longitudinais e transversais, derrame de óleo e outros solventes, escorregamento lateral, reparações e cortes técnicos, desagregação superficial dos agregados, fendas em “meia-lua” e desagregação superficial do mástique. A velocidade de levantamento da informação foi de aproximadamente 4 m/s para o levantamento noturno e 5 m/s para o levantamento diurno (Lima, 2016), no entanto, o equipamento utilizado possui características para a realização de levantamentos a velocidades mais elevadas.

Ao terminar o levantamento das degradações superficiais do pavimento flexível foram obtidos um conjunto de dados de georreferenciação e de imagem que, através do seu tratamento para visualização num Sistema de Informação Geográfica (SIG), permitiu a identificação das degradações superficiais existentes no pavimento em estudo, seus respectivos níveis de gravidade e aferição de áreas ou comprimentos de influência.

Foram identificados no levantamento com veículo um total de 4 degradações superficiais diferentes no pavimento flexível em estudo: pele de crocodilo, reparações e cortes técnicos, desagregação superficial do agregado e desagregação superficial do mástique em misturas betuminosas densas.

A Figura 5.8 apresenta um exemplo de folha de registo de dados de levantamento do estado do pavimento para uma unidade de amostra inspecionada.

FOLHA DE LEVANTAMENTO DO ESTADO DE PAVIMENTO FLEXÍVEL PARA UMA UNIDADE DE AMOSTRA								Esboço:			
Ramo: RWY		Secção: A		Unidade de amostra: 050							
Data: _____		Técnico: Bertha Santos e Débora Lima									
Área da unidade de amostra: 500 [m²]											
TIPO DE DEGRADAÇÃO:	N.G.	QUANTIDADE					OBS:	TOTAL	DENSIDADE [%]	VALOR DEDUZIDO	VALOR DEDUZIDO POR ORDEM
1. Pele de crocodilo (Alligator or fatigue cracking)	L							0,0	0,0		53,0
	M	40,0						40,0	8,0	53,0	19,5
	H							0,0	0,0		5,0
2. Exsudação (Bleeding)								0,0	0,0		
3. Bloco cruzadas (formando blocos) (Block cracking)	L							0,0	0,0		
	M							0,0	0,0		
	H							0,0	0,0		
4. Ondulação (Corrugation)	L							0,0	0,0		
	M							0,0	0,0		
	H							0,0	0,0		
5. Depressões (Depression)	L							0,0	0,0		
	M							0,0	0,0		
	H							0,0	0,0		
6. Erosão por "Jet-Blast" (Jet-blast erosion)								0,0	0,0		
7. Fendas de reflexão no local das juntas de pavimentos rígidos (longitudinal e transversais) (Joint reflection cracking from PCC)	L							0,0	0,0		
	M							0,0	0,0		
	H							0,0	0,0		
8. Fendas Longitudinais e transversais (Excluindo as fendas devidas à existência de juntas de pavimentos rígidos) (longitudinal and transverse cracking (non-pcc joint reflective))	L							0,0	0,0		
	M							0,0	0,0		
	H							0,0	0,0		
9. Derrame de óleo, combustível ou outros solventes (oil spillage)								0,0	0,0		
10. Reparações e cortes técnicos (patching and utility cut patch)	L							0,0	0,0		
	M							0,0	0,0		
	H	6,0						6,0	1,2	19,5	
11. Polimento de agregados (Polished Aggregate)								0,0	0,0		
12. Desagregação superficial do agregado (Raveling)	L							0,0	0,0		
	M							0,0	0,0		
	H							0,0	0,0		
13. Rodeiras (Rutting)	L							0,0	0,0		
	M							0,0	0,0		
	H							0,0	0,0		
14. Escorregamento lateral devido à existência de lajes rígidas (Shoving of asphalt pavement by PCC slabs)	L							0,0	0,0		
	M							0,0	0,0		
	H							0,0	0,0		
15. Fendas em forma de "meia-lua" (Slippage cracking)	L							0,0	0,0		
	M							0,0	0,0		
	H							0,0	0,0		
16. Empolamento (Swell-distress)	L							0,0	0,0		
	M							0,0	0,0		
	H							0,0	0,0		
17. Degradação superficial do mástico (em misturas betuminosas densas) [Weathering (surfasse wear)- Dense mix asphalt]	L	102,0						102,0	20,4	5,0	
	M							0,0	0,0		
	H							0,0	0,0		

Figura 5.8 - Folha de registo de dados de levantamento do estado de pavimentos flexíveis para uma unidade de amostra inspecionada (Lima, 2016).

É importante ressaltar que foram encontradas algumas dificuldades na identificação e distinção entre os níveis de gravidade no tratamento dos dados do levantamento feito durante o dia em dois tipos de degradação: desagregação superficial do mástique e desagregação superficial do agregado. Este problema poderá estar associado ao posicionamento da câmera, visto que foi verificado oscilação nos tons, como em cor das imagens, impedindo uma identificação eficaz da rugosidade contida na superfície do pavimento. De forma a minimizar o problema identificado, já que está relacionado a um aspeto de posicionamento da câmera, a identificação dos níveis de gravidade apoiou-se inicialmente numa calibração da identificação deste tipo de degradações nas imagens por comparação com os dados obtidos pelo levantamento tradicional (Lima, 2016).

Para o tratamento dos dados relativos ao levantamento feito no período noturno foi verificado oscilação dos faixes laser nas zonas onde se encontram as luzes de *centerline* e de *touchdown zone* (Lima, 2016) o que requereu um cuidado adicional na identificação das degradações existentes nestes locais.

5.6 Análise comparativa dos resultados obtidos pela auscultação dos pavimentos

A análise comparativa dos resultados obtidos pelas duas abordagens de auscultação dos pavimentos tem como principal finalidade validar o método indireto de recolha de dados desenvolvido no DECA-UBI, e por conseguinte, inovar na área dos sistemas de auscultação das degradações superficiais de pavimentos aeroportuários. Para o efeito, é feita uma avaliação por comparação estatística dos dados das degradações recolhidas durante o estudo experimental efetuado na pista 01-19 do AIAC e dos valores do índice PCI obtidos a partir desses dados, para os dois métodos de levantamento.

Os dados (variáveis) analisados referem-se ao tipo, nível de gravidade e densidade das degradações superficiais do pavimento aeroportuário obtidos para uma amostra da população em estudo por inspeção a pé e em veículo. A população em estudo corresponde a toda a superfície da pista e a amostra é constituída por 43 unidades de amostra inspecionadas pelos dois métodos de auscultação dos pavimentos.

5.6.1 Comparação inicial dos dados

A Tabela 5.3 apresenta as degradações identificadas no pavimento da pista 01-19 do Aeroporto Internacional Amílcar Cabral pelo levantamento tradicional a pé e pelo levantamento em veículo equipado. A tabela informa os níveis de gravidade e as respectivas densidades de cada tipo de degradação observada.

Tabela 5.3 – Degradações, níveis de gravidade e densidades observadas no pavimento da pista 01-19 do AIAC, por tipo de levantamento.

Tipo de levantamento e degradações identificadas	Densidade por nível de gravidade (%)*		
	Baixa	Média	Alta
Levantamento tradicional a pé			
Pele de crocodilo	2.00	1.83	0.07
Reparações e cortes técnicos	2.18	1.02	1.92
Desagregação superficial do agregado	0.70	2.66	11.13
Desagregação superficial do mástique em misturas betuminosas densas	4.78	7.82	16.00
Depressões	0.53	0.00	0.00
Fendas longitudinais e transversais, exceto fendas devido a existência de juntas de pavimentos rígidos	0.24	0.00	0.16
Soma (todas as degradações identificadas): 53.04	10.43	13.33	29.28
Soma (das 4 degradações também identificadas em veículo equipado): 52.11	9.66	13.33	29.12
Levantamento em veículo equipado	Baixa	Média	Alta
Pele de crocodilo	1.09	2.23	0.00
Reparações e cortes técnicos	0.10	2.35	1.15
Desagregação superficial do agregado	0.00	2.75	12.60
Desagregação superficial do mástique em misturas betuminosas densas	1.96	3.26	23.39
Soma (4 degradações): 50.88	3.15	10.59	37.14

*relativo ao total de áreas inspecionadas (43 unidades de amostra)

Ao fazer uma análise comparativa dos dados é possível verificar uma discrepância quanto ao total de degradações superficiais encontradas em cada levantamento, visto que, para o levantamento tradicional a pé foram identificadas 6 degradações superficiais diferentes, enquanto no levantamento em veículo equipado apenas foram observadas 4 degradações superficiais diferentes (ver Tabela 5.3).

As duas degradações não identificadas no levantamento em veículo equipado apresentam no levantamento tradicional a pé essencialmente densidades baixas e nível de gravidade baixo (B). As degradações do tipo depressões foram totalmente identificadas neste nível de gravidade pelo método tradicional, o que se acredita evidenciar uma limitação de identificação das degradações deste nível de gravidade através do método em veículo equipado, visto as dificuldades de interpretação das imagens para estes casos devido à qualidade de imagens.

As degradações do tipo fendas longitudinais e transversais (exceto fendas devido a existência de juntas de pavimentos rígidos) foram identificadas com níveis de gravidade baixo (0.24) e alto (0.16) pelo método tradicional, que embora possua valores baixos de densidade, evidencia uma limitação de identificação deste tipo de degradação. Acredita-se ter ocorrido pela qualidade das imagens capturadas para identificar degradações com nível de gravidade baixo e pela não identificação ou falha na alocação do tipo de degradação, por parte do inspetor, para o nível de gravidade alto durante a análise de imagens deste tipo de degradação.

Consequentemente, apenas será possível fazer a comparação das degradações verificadas nos dois levantamentos, que são: pele de crocodilo, reparações e cortes técnicos, desagregação superficial do agregado e desagregação superficial do mástique em misturas betuminosas densas.

As Figuras 5.9 a 5.12 possuem gráficos de comparação de densidades por tipo de degradação identificada (pele de crocodilo, reparações e cortes técnicos, desagregação superficial do agregado e desagregação superficial do mástique em misturas betuminosas densas) e por seus respectivos níveis de gravidade. Isto vai permitir identificar melhor em que tipo de degradações e níveis de gravidade existem mais limitações ou problemas de identificação com o veículo ou com a interpretação das imagens e definir estratégias para minimizar essas limitações.

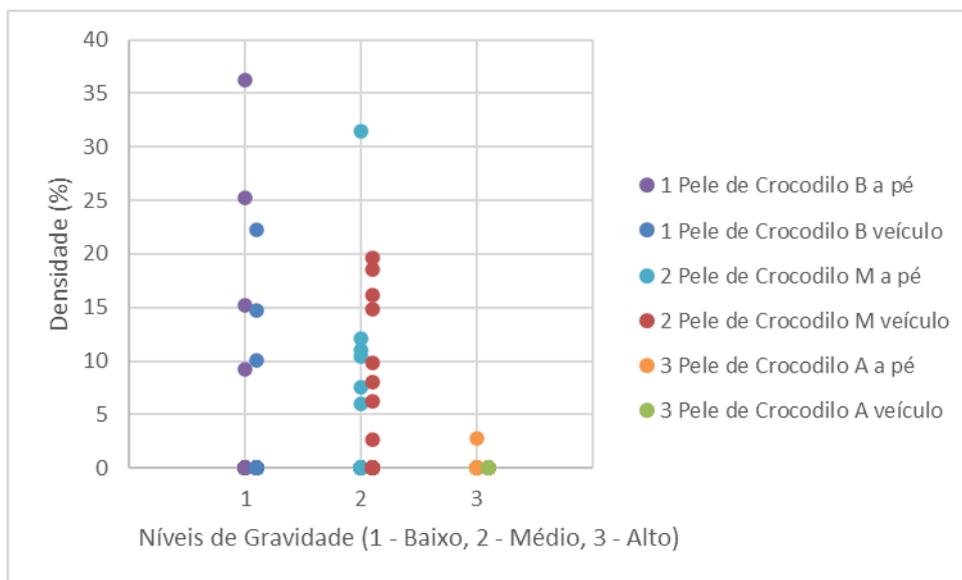


Figura 5.9 - Gráfico de comparação de densidades por degradação pele de crocodilo e por seus respectivos níveis de gravidade.

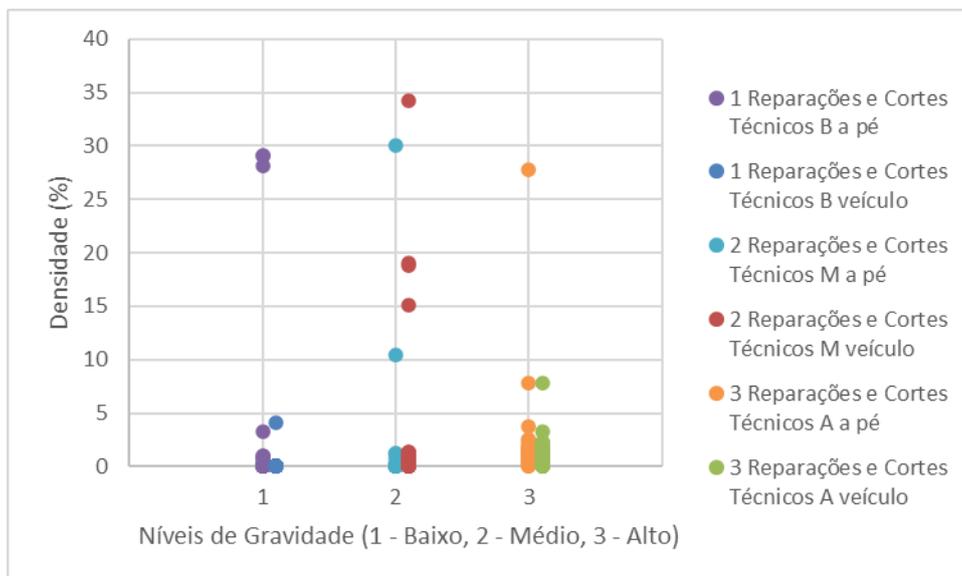


Figura 5.10 - Gráfico de comparação de densidades por degradação reparações e cortes técnicos e por seus respectivos níveis de gravidade.

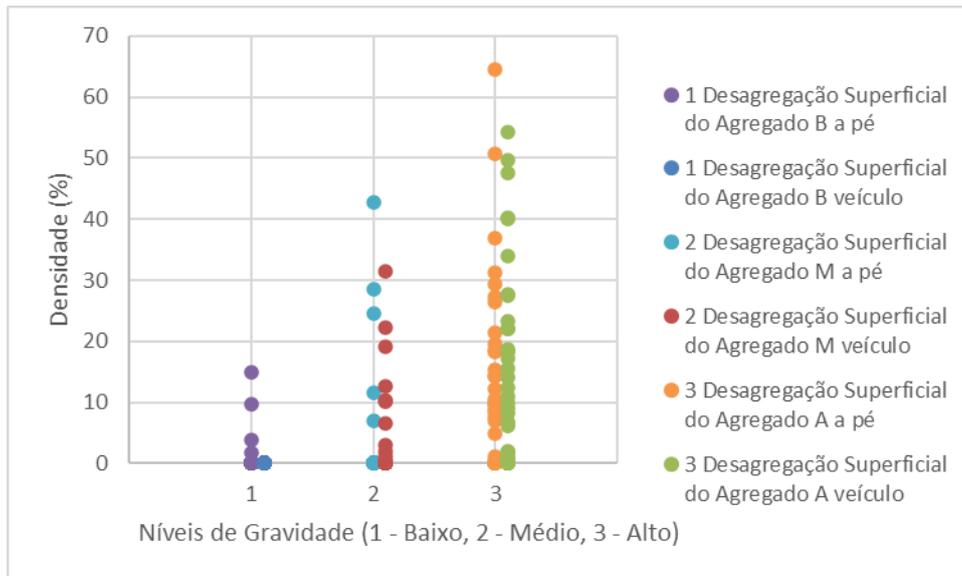


Figura 5.11 - Gráfico de comparação de densidades por degradação desagregação superficial do agregado e por seus respectivos níveis de gravidade.

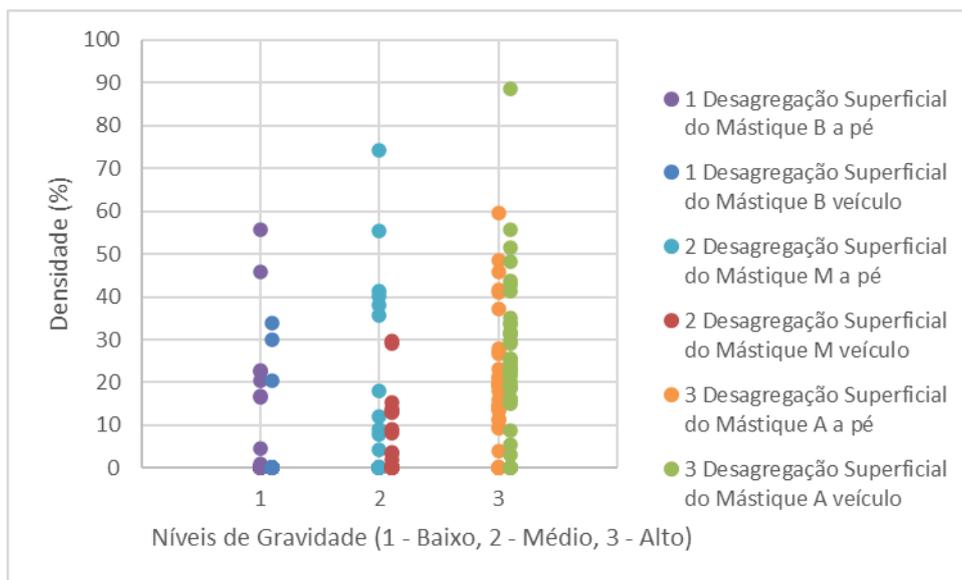


Figura 5.12 - Gráfico de comparação de densidades por degradação desagregação superficial do mástique em misturas betuminosas densas e por seus respectivos níveis de gravidade.

Pelas Figuras 5.10 a 5.12 e pela Tabela 5.3 pode-se observar que as degradações pele de crocodilo de nível de gravidade baixo, reparações e cortes técnicos de nível de gravidade baixo, desagregação superficial do agregado de nível de gravidade baixo e desagregação superficial do mástique em misturas betuminosas densas de níveis de gravidade baixo e médio possuem limitações de identificação das degradações através das imagens. Isto pode estar relacionado a algumas dificuldades em identificar e distinguir os níveis de gravidade das degradações desagregação superficial do agregado e desagregação superficial do mástique, mencionados por

Lima (2016); pelas dificuldades encontradas na indentificação de degradações com nível de gravidade baixo; e por falha na alocação dos níveis de gravidade das degradações por parte do operador que visualizou as imagens.

Essas limitações podem vir a ser superadas com melhorias no sistema proposto, sobretudo no equipamento de captação de imagem, de modo a obter imagens com melhor qualidade e detalhamento e pelo treinamento do operador para identificação adequada dos níveis de gravidade durante a análise de imagens.

É importante ressaltar que o tratamento de dados obtidos nos dois métodos de levantamento foi realizado pelo mesmo inspetor.

Em seguida, o valor do PCI por secção do pavimento e por unidade de amostra inspecionada, obtido por Lima (2016) para ambos os métodos, foi igualmente analisado (ver Tabela 5.4). Fica clara a semelhança entre os valores obtidos para os dois métodos, com a maioria dos resultados apresentando valores de PCI entre 25-40, o que traduz a necessidade de uma intervenção no pavimento da pista à curto prazo.

Tabela 5.4 - Valores de PCI obtidos para cada unidade de amostra inspecionada e secção da pista (adaptado de Lima, et al., 2017).

Secção	Tipo de levantamento	PCI por unidade de amostra	PCI por secção
A	Tradicional (a pé)	36, 38, 41, 43, 52, 20, 52, 27, 34, 46, 24, 11, 60, 46	38
	Veículo	30, 40, 45, 40, 52, 22, 46, 30, 37, 46, 26, 15, 54, 48	38
B	Tradicional (a pé)	22, 32, 48, 25, 22, 15, 17, 18, 27, 56, 38, 53, 31, 35, 20	30
	Veículo	26, 26, 41, 27, 28, 24, 18, 16, 30, 59, 38, 47, 31, 29, 25	31
C	Tradicional (a pé)	44, 27, 32, 36, 35, 20, 35, 63, 32, 43, 59, 25, 30, 26	36
	Veículo	47, 23, 32, 32, 29, 19, 35, 53, 32, 39, 54, 29, 24, 28	34

A representação da localização das unidades de amostra e respectivos índice PCI, para ambos os levantamentos (a pé e em veículo), podem ser consultados nos anexos IV e V.

As imagens abaixo (Figuras 5.13 a 5.15) fazem uma comparação dos valores do índice PCI obtidos pelo levantamento tradicional a pé e pelo levantamento em veículo e a representação da tendência/regressão linear, respectivamente para as secções A, B e C da pista do AIAC.

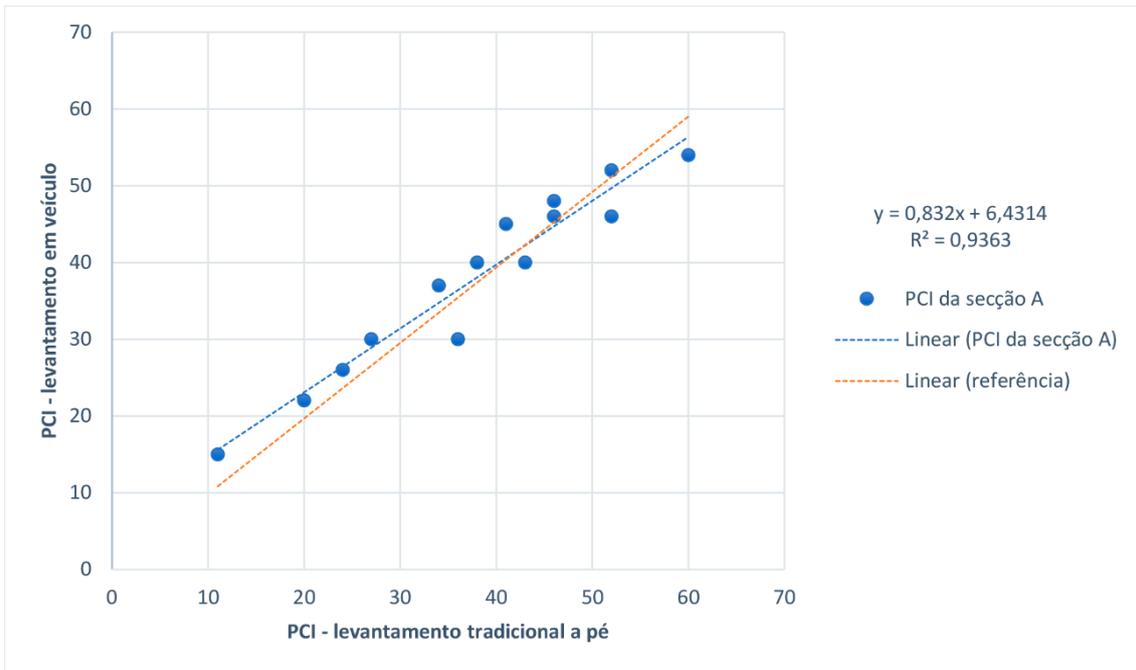


Figura 5.13 - Comparação dos valores de PCI obtidos na secção A pelos dois métodos de levantamento (a pé e em veículo) e tendência linear.

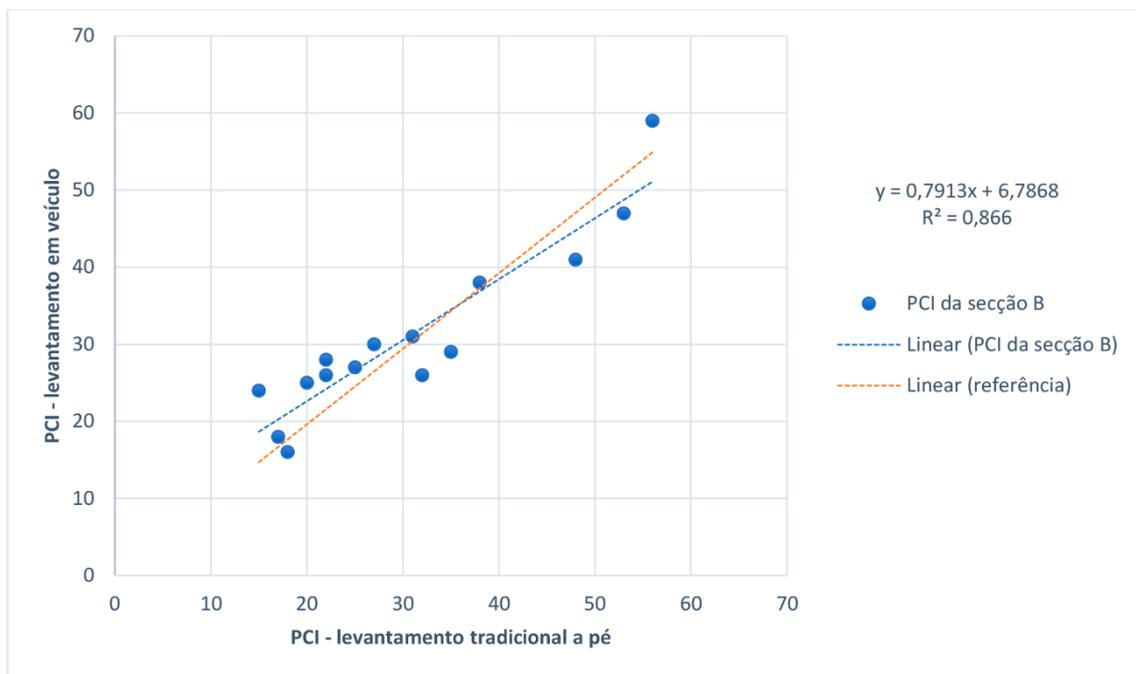


Figura 5.14 - Comparação dos valores de PCI obtidos na secção B pelos dois métodos de levantamento (a pé e em veículo) e tendência linear.

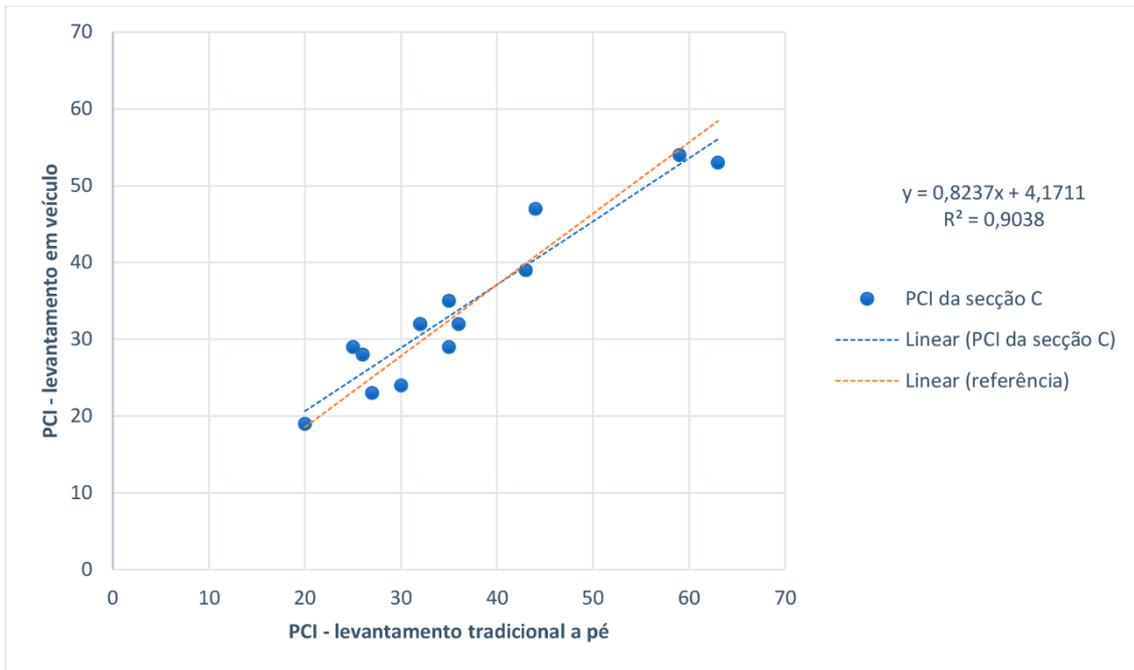


Figura 5.15 - Comparação dos valores de PCI obtidos na seção C pelos dois métodos de levantamento (a pé e em veículo) e tendência linear.

Analisando os gráficos de regressão linear dos resultados de PCI das unidades de amostra das seções A, B e C é possível observar que os valores de R^2 obtidos são: 0.9363 para seção A; 0.866 para seção B; e 0.9038 para seção C. Isto implica numa ótima representatividade uma vez que os valores são muito próximos de 100% (valor de maior a representatividade – variáveis iguais), isto é, que os valores do índice PCI em ambos os levantamentos são muito parecidos. A linha de referência se assemelha bastante com as linhas de PCI por seção (A, B e C) e os pontos estão pouco dispersos na reta. Essas conclusões são enfatizadas por um erro padrão da regressão de 3.0877 para a seção A, 4.2452 para a seção B e 3.4668 para a seção C.

Na Figura 5.16 pode ser observado a comparação dos valores de PCI obtidos nas seções A, B e C da pista pelos dois métodos de levantamento (a pé e em veículo) e tendência linear.

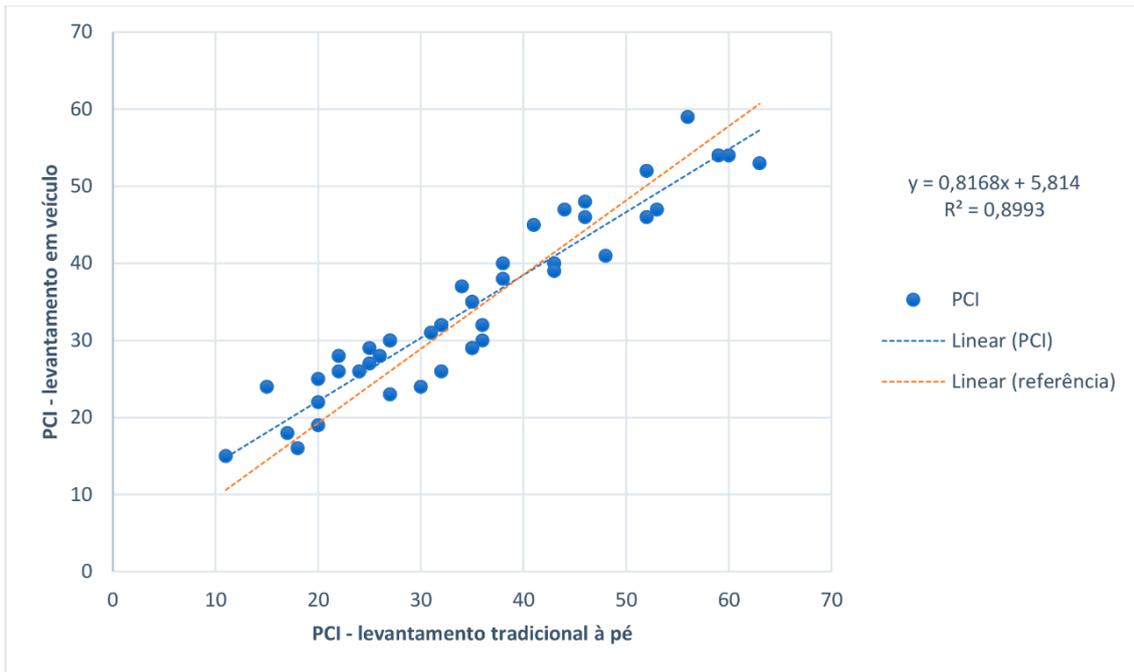


Figura 5.16 - Comparação dos valores de PCI obtidos nas secções A, B e C pelos dois métodos de levantamento (a pé e em veículo) e tendência linear.

Na Figura 5.16 é possível constatar que os valores de PCI não são sistematicamente muito altos nem muito baixos no espaço de observação. Estas conclusões são enfatizadas por um valor de R^2 de 89,93% e um erro padrão da regressão de 3.6386.

5.6.2 Análise estatística de comparação das duas amostras

Os testes estatísticos a considerar na análise estatística de comparação das duas amostras dependem essencialmente da forma como as variáveis em estudo são medidas, da sua qualidade e quantidade, do tipo de amostragem, da relação ou ausência de relação entre as amostras e da distribuição normal da mesma.

Para realização da análise estatística assume-se:

Hipótese nula (H_0): o uso do veículo equipado no levantamento das degradações não afeta os resultados obtidos;

Hipótese alternativa (H_A): o uso do veículo equipado no levantamento das degradações afeta os resultados obtidos.

Foi admitido um intervalo de confiança de 95%, ou seja, um nível de significância (α) menor ou igual a 0.05.

As variáveis estatísticas em análise são classificadas como variáveis quantitativas de razão, consoante suas características de medição e tamanho. Como referido anteriormente, a amostra em estudo foi determinada segundo a norma ASTM D5340-12 (2012). A amostragem é aleatória sistemática, uma vez que a primeira amostra foi selecionada aleatoriamente e as unidades de

amostra estão igualmente espaçadas ao longo das secções da pista. As duas amostras são emparelhadas, uma vez que as mesmas variáveis foram medidas nas mesmas unidades de amostra, por meio do levantamento tradicional a pé e por meio do levantamento em veículo, estando propositalmente relacionadas.

A partir das informações inicialmente recolhidas com recurso aos dois métodos de inspeção, as densidades por nível de gravidade para cada degradação identificada e os valores de PCI foram determinados. Estes valores serão usados neste estudo para comparar estatisticamente os dois métodos de auscultação dos pavimentos utilizados na pista principal (pista 01-19) do AIAC.

O estudo estatístico das variáveis selecionadas foi realizado através da análise da normalidade, de modo a determinar as características de distribuição das amostras, sobretudo o teste estatístico comparativo mais adequado ao estudo e, por fim, a análise comparativa através de testes paramétricos e não-paramétricos, visando validar o método de auscultação em veículo proposto.

5.6.2.1 Testes de normalidade

Os testes de normalidade são utilizados para verificar se os dados obedecem a uma distribuição normal ou não normal e, à partir desse pressuposto, escolher o teste estatístico de comparação de duas amostras mais apropriado para a base de dados em estudo. Existem, basicamente, dois tipos de testes: os testes paramétricos, os quais estabelecem que a forma da distribuição amostral deve ser conhecida, portanto, amostras normais são utilizadas para esse tipo de teste; e os testes não-paramétricos, que não necessitam do conhecimento da distribuição amostral, portanto, são utilizados quando se tem uma distribuição não normal (Marôco, 2014).

Tendo em conta o descrito, foi feita uma análise da normalidade da densidade por nível de gravidade (baixo, médio e alto) e tipo de degradação superficial identificada no pavimento, com recurso aos testes de normalidade de Shapiro-Wilk e de Kolmogorov-Smirnov.

A Tabela 5.5 apresenta os resultados dos testes de normalidade para as degradações superficiais em estudo, avaliadas por nível de gravidade.

Tabela 5.5 - Teste de normalidade para as duas abordagens de auscultação dos pavimentos.

Levantamento tradicional a pé						
Teste	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	p-value			p-value		
Nível de gravidade	Baixo	Médio	Alto	Baixo	Médio	Alto
Pele de crocodilo	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Reparações e cortes técnicos	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Desagregação superficial do agregado	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Desagregação superficial do mástique em misturas betuminosas densas	0.000	0.000	0.011	0.000	0.000	0.000
PCI	0.200			0.340		
Levantamento em veículo						
Nível de gravidade	Baixo	Médio	Alto	Baixo	Médio	Alto
Pele de crocodilo	0.000	0.000	*	0.000	0.000	*
Reparações e cortes técnicos	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Desagregação superficial do agregado	*	0.000	0.000	*	0.000	0.000
Desagregação superficial do mástique em misturas betuminosas densas	0.000	0.000	0.200	0.000	0.000	0.002
PCI	0.008			0.097		

* nível de gravidade não observado no conjunto de dados

Os *p-value* obtidos nos testes de normalidade indicam que os dois conjuntos de dados (a pé e em veículo) apresentam uma distribuição não normal dos dados (*p-value* < 0.05), exceto no caso da degradação desgaste superficial do mástique – nível de gravidade alto – levantamento em veículo, que apresenta uma distribuição normal de acordo com o teste de Kolmogorov-Smirnov. Esta degradação apresenta um número de casos e uma densidade maior que os outros 3 tipos de degradações, o que sugere ter influenciado no resultado do teste de normalidade, uma vez que, quanto maior o tamanho da amostra, maior a probabilidade de esta apresentar uma distribuição normal (ver Tabelas 5.3 e 5.5). Pode ainda ser observado na Figura 5.17, pela comparação da distribuição dos dados para o tipo de degradação desagregação superficial do mástique em misturas betuminosas densas de nível de gravidade alto, para ambos os métodos de inspeção (a pé e em veículo), que a distribuição é normal no levantamento em veículo e a curva de normalidade é unimodal e simétrica. A máxima frequência de unidade de amostra do levantamento em veículo coincide com a média das densidades (23.39), o que traduz a normalidade dos dados. No levantamento tradicional a pé não é observado simetria na distribuição da normalidade.

Desgregação Superficial do Mástique em Misturas Betuminosas Densas Nível de Gravidade Alto

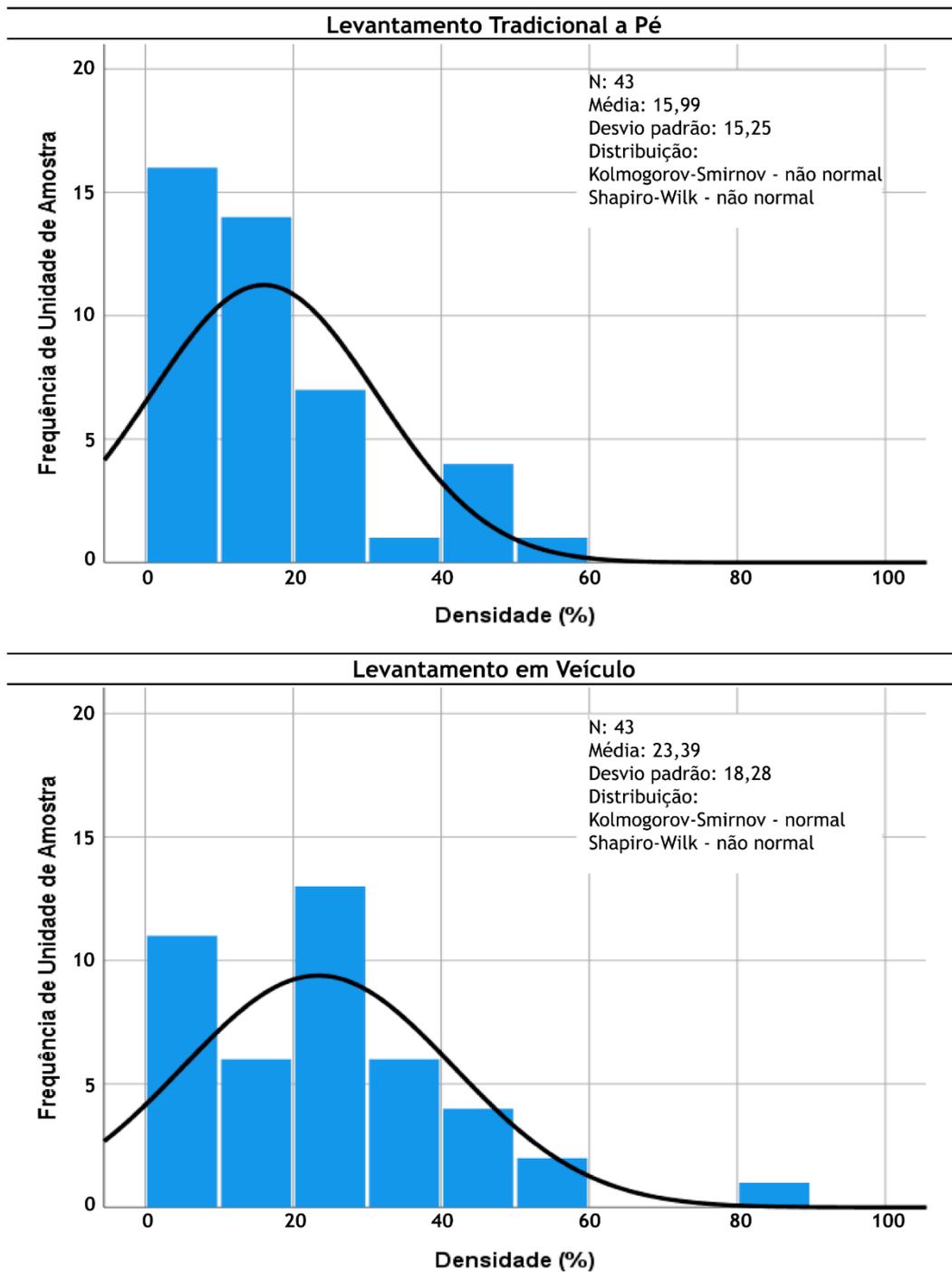


Figura 5.17 - Curvas de distribuição dos dados de densidade da degradação desagregação superficial do mástique para o nível de gravidade alto.

As configurações das curvas de distribuição dos dados das densidades das degradações sujeitas a análise estatística podem ser consultadas nos anexos VI, VII, VIII e IX.

Devido à verificação de não normalidade na distribuição dos dados de densidade das degradações, optou-se pelo teste não-paramétrico de Wilcoxon para comparar estatisticamente as duas amostras.

Os resultados do teste de normalidade de Shapiro-Wilk, a partir dos valores do índice PCI, apresentam um $p\text{-value} > 0.05$ (ver Tabela 5.5), identificando uma distribuição normal dos dados para o levantamento tradicional a pé e em veículo. De acordo com o teste de Kolmogorov-Smirnov, os valores do índice PCI obtidos a partir dos dados levantados em veículo não seguem uma distribuição normal.

Na Figura 5.18, pode ser observado pela distribuição dos valores de PCI, para o levantamento tradicional a pé, que a distribuição é normal e a curva de normalidade é unimodal e simétrica. A máxima frequência de unidade de amostra do levantamento a pé coincide com a média dos valores de PCI (34,79), o que traduz a normalidade dos dados. A máxima frequência de unidade de amostra do levantamento em veículo se aproxima da média dos valores de PCI (34,23), mas não é igual. O teste de Shapiro-Wilk caracterizou uma distribuição normal dos valores PCI, enquanto o teste de Kolmogorov-Smirnov caracterizou uma distribuição não normal dos valores PCI.

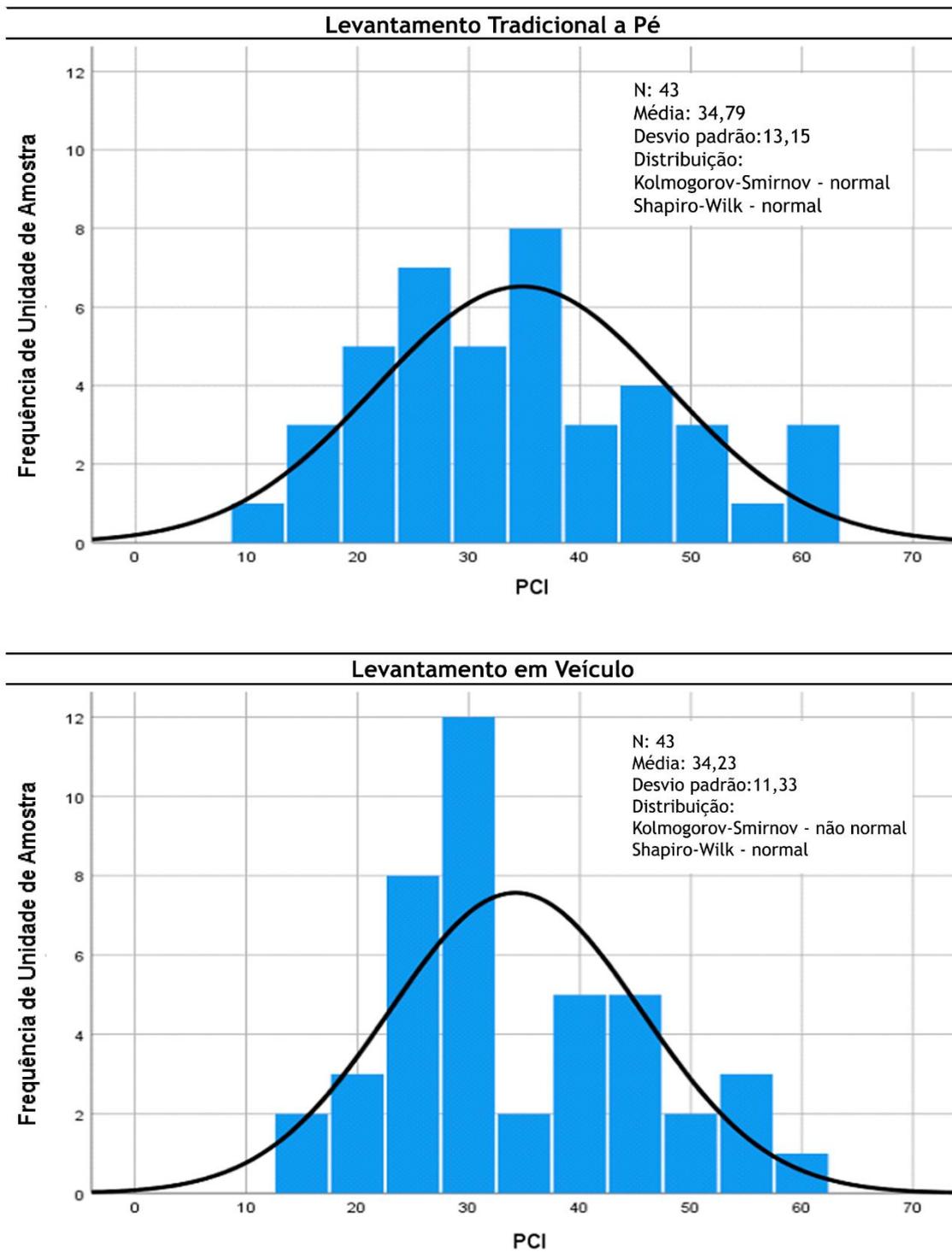


Figura 5.18 - Curvas de distribuição dos valores do índice PCI.

Tendo em conta estes resultados, optou-se por executar uma comparação estatística com testes paramétricos e não-paramétricos: T-test, e teste de Wilcoxon. Além disso, o F-test foi feito para comparar a variância das amostras.

5.6.2.2 Análise estatística comparativa

Tendo em conta os resultados obtidos da aplicação dos testes de normalidade, os testes estatísticos utilizados para comparar as amostras em estudo foram: o teste estatístico T-test e o teste estatístico de Wilcoxon.

O teste estatístico T-test é utilizado para avaliar se existe uma diferença significativa entre as médias de duas amostras emparelhadas obtidas aleatoriamente e com distribuição normal (Marôco, 2014). De acordo com esse teste, um $p\text{-value} > 0.05$ traduz que as amostras são comparáveis, o que significa, para o caso de estudo apresentado, a validação do método de levantamento de dados de degradações do pavimento com recurso a veículo equipado.

O teste de Wilcoxon é utilizado como uma alternativa ao T-test para amostras de distribuição não normal, quando se pretende comparar a medida de tendência central de duas amostras emparelhadas de um estudo experimental (Marôco, 2014). De acordo com esse teste, um $p\text{-value} > 0.05$ traduz amostras comparáveis, significando, para o caso de estudo apresentado, a validação do método inovador de levantamento proposto.

Os resultados obtidos a partir da aplicação dos testes t (T-test) e de Wilcoxon podem ser consultados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Resultados do Teste de Wilcoxon, T-test e F-test.

Variável	Teste de Wilcoxon <i>p-value</i>			T-test <i>p-value</i>	F-test <i>p-value</i>
	Baixo	Médio	Alto		
Nível de gravidade					
Pele de Crocodilo	0.068	0.657	0.317	Não aplicável	Não aplicável
Reparações e cortes técnicos	0.012	0.011	0.076		
Desagregação superficial do agregado	0.068	0.861	0.640		
Desagregação superficial do mástique em misturas betuminosas densas	0.114	0.122	0.008		
PCI	0.273			0.4025	0.3372

Nesta tabela, pode-se observar que os valores das densidades para todos os tipos de degradações identificados, com seus respectivos níveis de gravidade foram validados ($p\text{-value} > 0.05$) pelo teste de Wilcoxon, com exceção de três casos: para o tipo de degradação reparações e cortes técnicos com níveis de gravidade baixo e médio, o que pode estar relacionado com as diferenças encontradas entre os valores de densidade obtidos com os dois métodos de auscultação, sobretudo nos níveis de gravidade baixo e médio; e para o tipo de degradação desagregação superficial do mástique, de nível de gravidade alto, o que pode estar relacionado com a discrepância dos resultados de normalidade observados para este caso particular. De acordo com os resultados obtidos com o teste estatístico T-test (média estatística) e com o F-test (variância), é possível concluir que o uso do método inovador em veículo equipado para efetuar o levantamento das degradações superficiais do pavimento não interferiu no resultado do PCI, uma vez que os resultados dos T-test e o F-test das duas amostras apresentam $p\text{-values}$ superiores a 0.05, validando o sistema em veículo proposto.

Tendo em conta as limitações identificadas na análise de comparação efetuada, no ponto seguinte é apresentado um estudo exploratório das melhorias introduzidas no método de auscultação de pavimentos proposto com vista a ultrapassar esses aspetos e a alcançar uma validação total do método de auscultação em veículo equipado com dispositivos de varrimento laser e de captação e gravação de imagem e georreferenciação.

5.7 Estudo exploratório das melhorias introduzidas no método de auscultação de pavimentos proposto

De acordo com os resultados obtidos através da análise estatística, pode-se constatar que a qualidade da imagem prejudicou a identificação e avaliação dos níveis de gravidade das degradações do tipo depressões, fendas longitudinais e transversais, reparações e cortes técnicos, essencialmente para o nível de gravidade baixo, e desagregação superficial do mástique, para o nível de gravidade alto, uma vez que, para uma adequada distinção e avaliação do nível de gravidade, estas degradações necessitam da identificação de deformações e da rugosidade da textura da superfície dos pavimentos.

Dificuldades na identificação e atribuição dos níveis de gravidade, a partir da visualização das imagens, para as degradações do tipo fendas e reparações e cortes técnicos podem ser ultrapassadas com ações de formação dos inspetores direcionadas às particularidades da análise de imagens. Testes anteriores com o veículo equipado realizados em ambiente rodoviário permitiram identificar com sucesso estes tipos de degradações (Santos, et al., 2019). Também foi verificado por Débora Lima (2016) algumas complicações na determinação e distinção entre os níveis de gravidade no processamento dos dados do levantamento executado no período diurno em dois tipos de degradação: desagregação superficial do mástique e despreendimento do agregado. Esta dificuldade ocorreu devido a oscilação constatada nos tons das imagens, impossibilitando a avaliação eficaz da rugosidade encontrada na superfície do pavimento em estudo e acredita-se ter sido causada pelo posicionamento da câmara.

Para solucionar os problemas encontrados é proposto um conjunto de melhorias no sistema de auscultação com recurso a veículo equipado: substituição da câmara de vídeo *Garmin Elite* por uma câmara com maior qualidade de imagem e a adição de uma segunda câmara, orientada de forma a registar pequenas deformações e a rugosidade da superfície do pavimento, proporcionando deste modo, a validação completa do método proposto de levantamento de degradações da superfície do pavimento.

A Tabela 5.7 aponta as principais diferenças entre a câmara utilizada na realização do levantamento das degradações da superfície do pavimento da pista principal do Aeroporto Internacional Amílcar Cabral (PROTÓTIPO I) e as câmaras atuais introduzidas tendo em conta as alterações propostas (PROTÓTIPO II).

Tabela 5.7 - Especificações das câmeras.

PROTÓTIPO I Câmera de vídeo <i>Garmin Elite</i>	PROTÓTIPO II Câmera de vídeo <i>Olympus OM-D10MK3</i>
Resolução Largura: 1920 pixéis Altura: 1080 pixéis	Resolução Largura: 3840 pixéis Altura: 2178 pixéis

De modo a verificar a eficácia desta alteração no protótipo, foi executado um estudo exploratório das melhorias introduzidas no sistema de auscultação de degradações superficiais de pavimentos aeroportuários com recurso a veículo equipado de baixo custo. O estudo foi efetuado no antigo Aeródromo Municipal da Covilhã, situado no município da Covilhã, distrito de Castelo Branco, na região centro de Portugal. O local do antigo aeródromo ainda apresenta um trecho da pista 06-24, constituída por um pavimento flexível.

Na Figura 5.19 é apresentada a configuração da área da pista onde foi realizado o levantamento teste no período diurno (cabeceira 06).

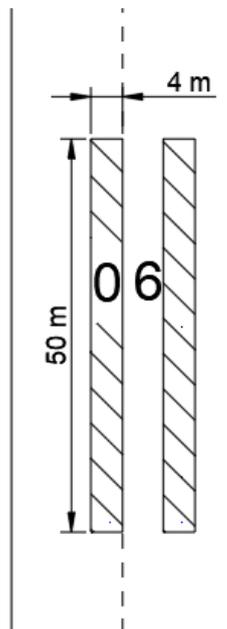


Figura 5.19 - Esboço da área da pista do antigo Aeródromo do Município da Covilhã inspecionada.

No que remanesce da pista do antigo aeródromo foi possível considerar duas unidades de amostras para estudo teste/exploratório do melhoramento introduzido no sistema de auscultação proposto. As unidades de amostra foram inspecionadas para levantamento das degradações do pavimento pelo método tradicional a pé e com recurso ao veículo equipado com uma nova configuração da estrutura de suporte do equipamento e câmaras com capacidade de registo de

imagem de maior qualidade. Para facilitar o levantamento das degradações superficiais, optou-se por considerar duas unidades de amostra com 4 m de largura por 50 m de comprimento, por conseguinte, cada unidade de amostra inspecionada possui uma área de 200 m².

A análise comparativa dos resultados obtidos pelas duas abordagens de auscultação dos pavimentos tem como principal finalidade comprovar o melhoramento da qualidade de imagem e, por conseguinte, a maior eficácia na identificação de degradações e respectivos níveis de gravidade. Para o efeito, é feita uma avaliação por comparação visual dos resultados obtidos, referentes às degradações recolhidas durante este estudo experimental, pelos dois métodos de auscultação do pavimento, de modo a atestar a melhoria do protótipo.

5.7.1 Levantamento visual tradicional a pé e com veículo equipado melhorado

O levantamento visual tradicional a pé foi realizado, conforme estabelecido nas secções 3.3.1 e 5.5.1 deste documento, nas duas unidades de amostra no período diurno e teve como resultado a identificação das degradações: fendas longitudinais, degradação causada por equipamento de construção e degradação superficial do mástique. O levantamento realizado em veículo com recurso a protótipo equipado melhorado tem como objetivo aferir as melhorias na identificação de degradações através dos dados de imagem.

O sistema melhorado é composto pelos seguintes equipamentos:

- 1 estrutura metálica para fixar o equipamento de captação de imagem;
- 2 câmaras de vídeo *Olympus OM-D10MK3* para captação de imagem;
- 2 feixes laser de 20 mW;
- 2 recetor GPS Dupla Banda (Trimble 4000SSi);
- 1 receptor de GPS GARMIN 17N;
- 1 computador portátil;
- 1 veículo do tipo misto.

O sistema utilizado no levantamento teste utilizou apenas os seguintes equipamentos:

- 1 estrutura metálica para fixar o equipamento de captação de imagem e de obtenção de dados de georreferenciação;
- 2 câmaras de vídeo *Olympus OM-D10MK3* para captação de imagem;
- 1 recetor GPS Dupla Banda (Trimble 4000SSi);
- 3 recetores de GPS com correção em tempo real por satélite – SBAS (Garmin 17N) sistema redundante de posicionamento por GPS;
- 1 computador portátil;
- 1 veículo do tipo misto.

A estrutura metálica com o equipamento de registo de imagem e posicionamento foi fixado na parte superior do veículo. O levantamento foi efetuado no período diurno visando atestar as dificuldades observadas substancialmente para esta situação, portanto, não houve necessidade de instalar os feixes laser para este levantamento. Os equipamentos GPS também foram fixados na parte superior do veículo (ver Figura 5.20).



Figura 5.20 - Veículo equipado melhorado.

Antes de dar início à campanha de auscultação do pavimento, foi conferido o alcance da imagem captada e efetuado o alinhamento do veículo de forma centralizada à unidade de amostra a ser inspecionada. Verificou-se que todos os equipamentos estavam preparados e procedeu-se ao levantamento dos dados a uma velocidade de aproximadamente 2,1 m/s.

Concluído o levantamento das degradações superficiais do pavimento em estudo, obteve-se um conjunto de imagens e de dados de georreferenciação que foram tratados e inseridos, visualizados e avaliados no SIG, de modo a identificar todas as degradações superficiais existentes no pavimento, seus respectivos níveis de gravidade e áreas de influência.

Na Figura 5.21 pode-se observar que as coordenadas obtidas segundo a segundo através do receptor GPS Dupla Banda (Trimble 4000SSi) seguem retilíneas, atestando que o veículo fez o trajeto com pouca oscilação.



Figura 5.21 - Coordenadas registadas do levantamento em veículo visualizadas no SIG.

Executou-se uma análise de pós-processamento do recetor GPS Dupla Banda no *Canadian Spatial Reference System – Precise Point Positioning (CSRS-PPP)*, através do site *Natural Resources Canada*, resultando em um erro de posicionamento na ordem de 7 cm, o que é aceitável para este tipo de levantamento.

Verificou-se uma captação de 24 imagens por segundo pelas câmeras de vídeo *Olympus OM-D10MK3* e uma sobreposição longitudinal das imagens de 14 cm. Tendo em conta estes dados foi efetuada uma captura de quatro imagens por segundo para as duas câmaras, com alcance de 244 por 138 píxeis, totalizando uma amplitude transversal de imagem de 4 m.

As degradações obtidas pelo levantamento teste em veículo nas duas unidades de amostra durante o dia foram: fendas longitudinais, degradação causada por equipamento de construção e degradação superficial do mástique.

5.7.2 Análise dos resultados

A Figura 5.22 compara uma imagem captada pela câmara *Garmin Elite*, no levantamento em veículo executado na pista principal do Aeroporto Internacional Amílcar Cabral, Ilha do Sal, Cabo Verde, com uma imagem captada pela câmara *Olympus OM-D10MK3*, no levantamento em veículo executado no Aeródromo Municipal da Covilhã, Covilhã, Portugal.

As imagens obtidas através da câmera *Garmin Elite* (utilizada no primeiro protótipo) possuem uma largura de captação de 6 m com considerável distorção da imagem nos extremos, como pode ser observado na Figura 5.22. A atual câmera (*Olympus OM-D10MK3*) consegue ultrapassar esta limitação uma vez que diminuiu quase que totalmente essa distorção. Por conseguinte, as imagens obtidas com a câmera *Olympus OM-D10MK3* permite a obtenção de dados mais próximos da realidade e a realização de análises mais fiáveis.

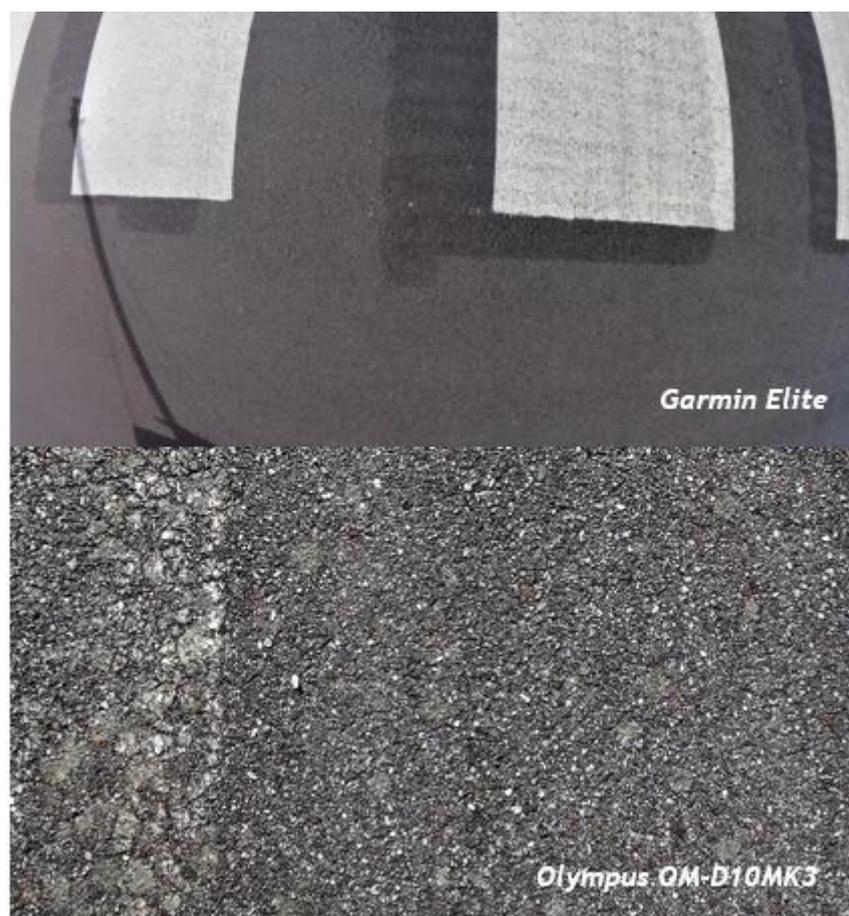


Figura 5.22 - Comparação de imagens captadas com as câmeras Garmin Elite e Olympus QM-D10MK3.

É possível observar ainda que embora as imagens tenham sido capturadas em pavimentos diferentes, sujeitos a agressões diferentes, as obtidas com a câmera *Olympus QM-D10MK3* possuem mais pormenores em relação às obtidas com a câmera *Garmin Elite*, facilitando a identificação e distinção dos níveis de gravidade das degradações no SIG.

Embora a câmera *Olympus QM-D10MK3* permita a obtenção de imagens com 3840 por 2178 pixels, foi utilizada a configuração de 1920 por 1088 pixels para o levantamento efetuado no aeródromo da Covilhã, portanto, ainda é possível alcançar imagens de qualidade superior e, conseqüentemente, obter maior eficácia na identificação das degradações observadas.

As imagens obtidas com o primeiro protótipo (*Garmin Elite*) apresentam uma dimensão de 400 KB e as imagens obtidas no levantamento teste com a mesma resolução de imagem apresentam uma dimensão de 4 MB. O algoritmo de compressão da imagem da câmera *Garmin Elite* elimina os detalhes mais pequenos da imagem, tornando a imagem menor mas com falta de pormenores, o que não acontece tão fortemente na *Olympus OM-D10MK3*. As imagens das câmeras de vídeo *Olympus OM-D10MK3* ainda podem chegar a imagens de qualidade superior de 4K com 12 MB.

Os resultados para as densidades de degradação por nível de gravidade obtidos através do levantamento das duas unidades de amostra da pista principal do antigo Aeródromo do Município da Covilhã, pelos dois métodos de auscultação (a pé e em veículo equipado), podem ser observados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Degradações observadas no pavimento e densidades por nível de gravidade e tipo de levantamento.

Tipo de levantamento e degradações identificadas	Densidade por nível de gravidade (%)*		
	Baixa	Média	Alta
Levantamento tradicional a pé			
Fendas longitudinais e transversais, exceto fendas devido a existência de juntas de pavimentos rígidos	53.75	40.75	5.5
Desagregação causada por equipamento de construção	0.00	0.00	11.00
Desagregação superficial do mástique em misturas betuminosas densas	0.00	54.50	12.25
Levantamento em veículo equipado	Baixa	Média	Alta
Fendas longitudinais e transversais, exceto fendas devido a existência de juntas de pavimentos rígidos	55.46	39.75	5.36
Desagregação causada por equipamento de construção	0.00	0.00	10.68
Desagregação superficial do mástique em misturas betuminosas densas	0.00	56.30	14.17

*relativo ao total de áreas inspecionadas (2 unidades de amostra)

Fazendo uma análise comparativa dos resultados obtidos na Tabela 5.8, percebe-se que foram identificados três tipos de degradações em ambos os levantamentos, nomeadamente fendas longitudinais e transversais, desagregação causada por máquina, desagregação superficial do mástique em misturas betuminosas densas. A semelhança entre os valores das densidades obtidas por tipo de degradação e seus respectivos níveis de gravidade para os dois métodos traduz o melhoramento do protótipo em estudo, no entanto, um teste a uma escala maior é desejável para validar de forma mais suportada as melhorias implementadas.

As melhorias implementadas no protótipo vão permitir sobretudo identificar degradações que apresentam níveis de gravidade baixo, atribuir níveis de gravidade adequados (uma vez que a tendência apresentada no tratamento dos dados do Sal apontam para uma má identificação dos níveis de gravidade por visualização das imagens nos níveis mais elevados) e identificar melhor

as degradações relacionadas com a desagregação superficial do mástique e desprendimento de agregados.

6. Conclusões e Trabalhos Futuros

O presente trabalho está disposto em duas partes fundamentais, a primeira destinada ao embasamento teórico, dando suporte ao desenvolvimento da segunda parte, destinada à prática, onde é apresentado um caso de estudo desenvolvido com dados recolhidos na pista principal do Aeroporto Internacional Amílcar Cabral (AIAC, Cabo Verde) e um estudo exploratório executado com informação recolhida na pista do antigo Aeródromo Municipal da Covilhã.

No desenvolvimento da parte teórica do trabalho foi possível constatar a importância da adoção de Sistema de Gestão de Pavimentos Aeroportuários (SGPA) para garantir que os pavimentos apresentem boas características estruturais e funcionais ao longo do seu ciclo de vida. O desenvolvimento e implementação dessa ferramenta permite gerenciar os pavimentos aeroportuários de maneira prática e sustentável, auxiliando o administrador na tomada de decisões através da implementação de um conjunto de componentes que garantem o bom funcionamento do sistema: inventário da rede, avaliação do estado do pavimento, base de dados, análise de dados e resultados do sistema. Além disso, foi estabelecida a importância de uma base de dados organizada e consistente, que possua quantidade adequada de dados com qualidade, relativos à estrutura e ao estado dos pavimentos da infraestrutura aeroportuária. A obtenção desses dados é essencial para o desenvolvimento da componente “Avaliação do estado dos pavimentos” do SGPA, que geralmente utiliza o índice PCI para traduzir a integridade estrutural e as condições operacionais em que se encontra o pavimento, portanto, suportando a definição das necessidades de intervenção sobre o pavimento.

Nesta parte do trabalho foram ainda apresentadas as principais abordagens utilizadas ao longo dos anos para recolher dados relativos ao estado superficial do pavimento aeroportuário, salientando a importância da escolha do método a adotar para o sucesso do SGPA, isto é, que garanta a recolha de dados com qualidade e de forma eficaz. As abordagens de recolha de dados de pavimentos aeroportuários evoluíram do levantamento tradicional a pé para o uso de veículos multifuncionais e, mais recentemente, para o uso de veículos aéreos não tripulados (drones). Neste contexto, foi possível perceber que o recurso ao levantamento tradicional a pé das degradações superficiais dos pavimentos é menos apelativo para infraestruturas aeroportuárias com restrições operacionais, financeiras e/ou de recursos humanos disponíveis para sua realização.

De seguida têm-se o embasamento teórico sobre a análise estatística de comparação de dados para a validação de uma amostra, de modo a apoiar o desenvolvimento da componente prática deste trabalho. A análise estatística permite caracterizar a amostra com base na forma de medição, quantidade e qualidade das suas variáveis, tipo de amostragem, relação ou ausência de relação entre as amostras a comparar e distribuição dos dados. O tipo de distribuição dos dados define por sua vez o teste comparativo estatístico que melhor se aplica para validação da amostra em estudo.

Relativamente à componente prática, foi desenvolvido um caso de estudo onde são avaliados, através de uma análise estatística de comparação, um conjunto de dados referentes ao tipo, densidade e níveis de gravidade de degradações superficiais presentes num pavimento aeroportuário obtidos com recurso a duas abordagens de levantamento: tradicional a pé e por um método inovador de baixo custo constituído por um veículo equipado com dispositivos de varrimento laser e de captação e gravação de dados de imagem e georreferenciação. Os valores obtidos para o índice PCI por unidade de amostra para as duas abordagens são igualmente estudados. Os dados relativos ao estado do pavimento foram recolhidos na pista principal do Aeroporto Internacional Amílcar Cabral (AIAC), localizado na Ilha do Sal, Cabo Verde. Da comparação dos dados e valores de PCI obtidos a partir das duas abordagens de auscultação dos pavimentos, observa-se que o método de auscultação proposto com recurso a veículo equipado apresenta como principais vantagens sobre o método de auscultação tradicional a pé:

- A redução do tempo necessário para recolher os dados relativos às degradações superficiais do pavimento, uma vez que demorou apenas 3 dias para levantar a informação relativa a todas as unidades de amostra (270) do pavimento, totalizando toda a área da pista, enquanto o levantamento tradicional demorou cerca de 3 semanas para levantar apenas as unidades de amostra mínimas (43) selecionadas para o estudo;
- Redução de custos, uma vez que o levantamento em veículo equipado é efetuado mais rapidamente;
- O processamento dos dados relativos às degradações superficiais do pavimento em gabinete através da introdução, visualização e interpretação destes num Sistema de Informação Geográfica (SIG);
- A reavaliação, caso necessária, dos dados relativos às degradações superficiais do pavimento nas mesmas condições que as observadas no instante do registo de imagem;
- Viabiliza a comparação de dados de imagem e alfanuméricos de várias inspeções realizadas ao longo do tempo no pavimento, apoiando estudos de tendência de evolução do estado do pavimento;
- Permite o controle de qualidade da identificação e medição das degradações.

Como vantagem do método de recolha de dados tradicional a pé sobre o método de recolha de dados proposto em veículo equipado aponta-se para a possibilidade de aferir no local, por visualização direta, as degradações e níveis de gravidade.

Portanto, o caso de estudo tem como objetivo principal verificar a eficiência da abordagem em veículo equipado, que, aparenta ser um método mais funcional a ser aplicado, já que é menos dispendioso em tempo e recursos que a abordagem tradicional a pé.

A análise comparativa dos dados das degradações superficiais obtidos pelos dois métodos de levantamento permitiu verificar diferenças no tipo de degradações identificadas e na distribuição das densidades por níveis de gravidade.

Da comparação dos tipos de degradações identificadas para cada abordagem foi observado que o levantamento tradicional a pé identificou mais dois tipos de degradações superficiais do pavimento, de nível de gravidade baixo e valores baixos de densidade, do que o levantamento em veículo equipado, correspondendo às degradações depressões e fendas longitudinais e transversais, exceto fendas devido a existência de juntas de pavimentos rígidos. As degradações do tipo pele de crocodilo, reparações e cortes técnicos, desagregação superficial do agregado e desagregação superficial do mástique em misturas betuminosas densas foram identificadas nos dois tipos de levantamentos.

As densidades identificadas por anáse das imagens, referente aos 4 tipos de degradações em comum, pelos dois métodos de auscultação, respectivamente para os níveis de gravidade baixo, médio e alto foram: 9.66, 13.33 e 29.12 para o levantamento tradicional a pé; 3.15, 10.59 e 34.14 para o levantamento em veículo equipado. As diferenças entre as densidades entre os dois tipos de levantamentos evidencia as dificuldades encontradas na alocação do tipo de degradação nas classes mais altas (médio e alto) e na identificação do nível de gravidade baixo.

Esta análise reflete um melhor desempenho na identificação das degradações e níveis de gravidade por visualização direta, especialmente para a gravidade de nível baixo e alocação dos níveis de gravidade.

Tendo em conta o tipo de variável (quantitativa de razão), o tipo de amostragem (aleatória sistemática), relação entre as amostras (emparelhadas) e os resultados de distribuição dos dados, que é essencialmente não normal para as densidades e normal para o índice PCI, foram aplicados testes de comparação estatística de Wilcoxon para as densidades e de Wilcoxon e T-test para o índice PCI que apresentaram como resultados a validação de todos os tipos de degradações indetificadas, com exceção de três casos (reparações e cortes técnicos com níveis de gravidade baixo e médio e desagregação superficial do mástique com nível de gravidade alto) e validação dos resultados do PCI. A não validação dos três casos de degradação pode estar relacionado com as diferenças entre os valores de densidade obtidos pelos dois métodos de auscultação dos pavimentos e, especificamente para a degradação desagregação superficial do mástique, pode estar relacionado ainda com a discrepância observada nos resultados de normalidade.

É possível concluir, a partir da análise estatística comparativa dos dados de densidade por nível de gravidade das degradações do pavimento obtidos pelos dois métodos de levantamento, uma ótima representatividade do levantamento tradicional em veículo sobre o levantamento tradicional a pé e validar o método inovador de baixo custo proposto.

Ainda na parte prática do estudo, foi efetuado um levantamento teste das degradações existentes em duas unidades de amostra do pavimento da pista principal do antigo Aeródromo Municipal da Covilhã com a utilização do sistema proposto com recurso a veículo equipado melhorado.

As melhorias introduzidas visam superar as limitações identificadas na análise comparativa efetuada. Para o efeito foi redesenhada a estrutura de suporte do equipamento de recolha de dados e feita a substituição da câmara de vídeo *Garmin Elite* por uma câmara com maior qualidade de imagem (câmara de vídeo *Olympus OM-D10MK3*) e a adição de uma segunda câmara, direcionada para registrar deformações pequenas e a rugosidade da superfície do pavimento, de modo a conseguir a validação total do método inovador de auscultação.

Através da análise comparativa dos dados e resultados obtidos pelos dois métodos de auscultação usados no levantamento teste (a pé e em veículo - sistema melhorado), pode-se constatar uma melhoria na identificação das degradações e na distinção dos respectivos níveis de gravidade através do uso de câmeras com maior qualidade de imagem. Em ambos os levantamentos foram identificados os mesmos tipos de degradações com densidades por nível de gravidade muito semelhantes, proporcionando a validação completa do método de levantamento de dados proposto.

Como desenvolvimentos futuros apontam-se:

- Desenvolver um estudo com o sistema melhorado, numa escala que permita a verificação mais sustentada da eficácia das alterações introduzidas no sistema proposto, com vista à sua validação através da análise estatística de comparação;
- Aplicar o método de auscultação proposto em pavimentos rígidos (placas de estacionamento) e caminhos de circulação.

7. Referências Bibliográficas

AC 150/5380-6C. 2014. *Guidelines and Procedures for Maintenance of Airport Pavements*. s.l. : FAA, 2014.

AC 150/5380-7B. 2014. *Airport Pavement Management Program (PMP)*. s.l. : FAA, U.S. Department of Transportation, USA, 2014.

Almeida, Ray . 2016. *Uma história da Ilha do Sal*. 2016.

Análise Comparativa de Métodos de Pavimentação - Pavimento Rígido (concreto) x Flexível (asfalto). Araújo, Marcelo Almeida, et al. 2016. 11, s.l. : Revista Científica Multidisciplinar Núcleo Do Conhecimento, Novembro de 2016, Vol. 10.

Applied. 2013. *Washington Airport Pavement Management Manual*. U.S. : Applied Pavement Technology, Inc, 2013.

ASTM D5340-12. 2012. *Standart Test Method for Airport Pavement Condition Index Surveys*. s.l. : American Society for Testing and Materials, 2012.

Barbarella, M., Blasiis, M. R. De e Fiani, M. 2019. *Terrestrial laser scanner for the analysis of airport pavement geometry*. s.l. : Int. J. Pavement Eng., vol. 20, no. 4, pp. 466-480, 2019.

Barca, María e Nogueira , Sara. 2015. *Análise de Técnicas de Conservação de Pavimentos Rodoviários*. Dezembro de 2015.

Barros , Ricardo Lemo de . 2008. *Gestão da Conservação de Pavimentos de Aeroportos e Aeródromos*. Coimbra : Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade de Coimbra, 2008.

Bastos, B. e Filho, L. 2012. *Utilização da tecnologia LiDAR em projetos de engenharia de infraestrutura viária*. Villa Carlos Paz (Argentina) : Artigo publicado no XI Congresso Nacional y VIII Latinoamericano de Agrimensura, 2012.

Brooks, C., et al. 2018. *Implementation of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Assessment of Transportation Infrastructure - Phase II*. s.l. : Michigan Department of Transportation , 2018. 164p..

Carvalho, Ana Filipa Carreiro e Santos, Luís Guilherme de Picado. 2017. *Maintenance of airport pavements: the use of visual inspection and IRI in the definition of degradation trends*. Lisboa : s.n., 2017.

Carvalho, Pedro, Gézero, Luís e Hilário, Paulo. 2019. *GEORREFERENCIAÇÃO DE ATIVOS RODOVIÁRIOS COM RECURSO A SISTEMAS LIDAR MÓVEIS TERRESTRES*. Lisboa, Portugal : s.n., 2019.

- Chen, W., Yuan, J. e Li, M. 2012. *Application of GIS/GPS in Shanghai airport pavement management system,* in *Procedia Engineering*, 2012. s.l. : vol. 29, pp. 2322-2326, 2012.
- Complete, P., et al. 2019. *The Application of Unmanned Aerial Systems in Surface Transportation*. 2019.
- Di Mascio, P. e Moretti, L. 2019. *Implementation of a pavement management system for maintenance and rehabilitation of airport surfaces*. s.l. : Case Stud. Constr. Mater., 2019.
- Domingos, Adriana Sofia Madeira. 2017. *Determinação e Interpretação do Índice PCI de Pavimentos Aeroportuários*. Covilhã : Universidade da Beira Interior, Dissertação de mestrado, 2017.
- Domingos, Adriana, Santos , Bertha e G. Almeida, Pedro. 2017. *Determinação e Interpretação do Índice PCI para a Avaliação de Pavimentos Aeroportuários*. 2017.
- Duran, Jorge Braulio Cossio. 2015. *Sistema de gerência de pavimentos aeroportuários: estudo de caso no aeroporto estadual de Araraquara*. São Paulo : s.n., 2015.
- Dynatest International. 2017. *Dynatest*. [Online] 09 de 01 de 2017. [Citado em: 2 de 11 de 2019.] <https://www.dynatest.com/>.
- Estradas de Portugal. 2008. *Sistema de Gestão de Pavimentos: Manual de Utilização*. Estradas de Portugal, S. A. Almada : s.n., 2008.
- FAA. 2014. *Airport Pavement Management Program (PMP)*. AC 150/5380-7B, Federal Aviation Administration : U.S. Department of Transportation, USA, 2014.
- Feitosa , Ianca, Santos, Bertha e Almeida, Pedro G. 2019. *Validação de um método indireto de recolha de dados para avaliação do estado de pavimentos aeroportuários*. Covilhã : s.n., 2019.
- Fernandes, Cristina Isabel Cachado dos Santos Henriques. 2010. *Sistema de Gestao de Pavimentos Aeroportuários - Caracterização e Aplicabilidade* . Lisboa : Instituto Superior Tecnico, Universidade Técnica de Lisboa , 2010.
- GEOeduc. 2018. geoeduc.com. *GEOeduc - qualificação sem fronteiras* . [Online] 25 de 06 de 2018. [Citado em: 11 de 05 de 2020.] <http://geoeduc.com/2018/06/25/lidar-laser-na-topografia/>.
- Haas R, Hudson WR e Zaniewski J. 1994. *Modern Pavement Management*. Malabar : s.n., 1994.
- Horta, Carlos Santinho, et al. 2013. *O SISTEMA DE GESTÃO DE CONSERVAÇÃO DE PAVIMENTOS DA ESTRADAS DE PORTUGAL, S.A. - BALANÇO DE UMA IMPLEMENTAÇÃO CONSOLIDADA*. [ed.] Direção de Construção e Manutenção, Praça da Portagem Estradas de Portugal. Almada : s.n., 2013.

ICAO. 2013. *Annex 14 to Conventions on International Civil Aviation - Aerodromes, Volume I, Aerodrome Design and Operations.* s.l. : 6nd Ed; International Civil Organization, Montréal, Canada, 2013.

INE. 2012. <https://ine.ufsc.br/>. *UFSC, Universidade Federal de Santa Catarina.* [Online] Departamento de Informática e Estatística (INE), 03 de 12 de 2012. [Citado em: 15 de 10 de 2019.]

Irfan, Muhammad, et al. 2015. *Framework for airfield pavements management-an approach based on cost-effectiveness analysis.* 2015.

Jiang, Liming, Xie, Yuanchang e Ren, Tianzhu. 2020. *A deep neural networks approach for pixel-level runway pavement crack segmentation using drone-captured images.* s.l. : Transp. Res. Board 99th Annu. Meet., 2020.

Keegan, Katherine e Jung, Kenneth. 2014. *Innovative Approach to Airfield Pavement Inspections and Distress Identification at Oakland International Airport.* 2014.

Laureano, Raul. 2011. *Testes de Hipóteses com o SPSS - O Meu Manual de Consulta Rápida.* [ed.] Manuel Robalo. Lisboa : Edições Sílabo, Lda., 2011.

Lima, Débora Sofia Gomes Maurício. 2016. *Sistema de Gestão de Pavimentos Aeroportuários para Cabo Verde.* Covilhã : Universidade da Beira Interior, Dissertação de mestrado, 2016.

Lima, Débora, Santos , Bertha e Almeida, Pedro. 2020. *Proposal of an Airport Pavement Maintenance Management System for Cape Verde.* STARTCON19 - International Doctorate Students Conference + Lab Workshop in Civil Engineering / Pages 49-60. : s.n., 2020.

Lima, Débora, Santos, Bertha e Almeida , Pedro. 2019. *Methodology to assess airport pavement condition using GPS, laser, video image and GIS.* . s.l. : Taylor & Francis Group, London., 2019.

Lima, Débora, Santos, Bertha e G. Almeida, Pedro. 2017. *Metodologia de recolha de dados para avaliação da qualidade de pavimentos aeroportuários.* 2017.

Maganinho, Leonor Graciete de Oliveira. 2013. *Desenvolvimento de uma base de dados de patologias para avaliação da qualidade de pavimentos rodoviários com recurso a GPS, imagem vídeo e SIG.* Covilhã : Universidade da Beira Interior, Dissertação de mestrado , 2013.

Marôco, João. 2014. *Análise estatística com o SPSS Statistics.* 6ª edição. Lisboa : Edições Sílabo, Lda., 2014.

McNerney, Michael T. e Harrison, Robert. 1995. *Full-Cost Approach to Airport Pavement Management. Handbook of Airline Economics.* U.S. : Handbook of Airline Economics, McGraw-Hil, 1995.

MDOT. 2008. *STATEWIDE PAVEMENT MANAGEMENT REPORT PHASE ONE AND TWO AIRPORTS.* Michigan Department of Transportation : Bureau of Aeronautics and Freight Services Airports Division 2700 E, 2008.

Microdrones. 2019. www.microdrones.com. *Microdrones*. [Online] EXTREME LIDAR DATA COLLECTION, WITH CONVENIENT PLANS AND DATA PROCESSING OPTIONS, 2019. [Citado em: 12 de 05 de 2020.] <https://www.microdrones.com/en/integrated-systems/mdlidar/mdlidar3000-aas/>.

Moraes, Carlos. 2005. *Escalas de medida, estatística descritiva e inferência estatística.* 2005.

NEON. 2016. www.neonscience.org. *NEON*. [Online] The Basics of LiDAR - Light Detection and Ranging - Remote Sensing. National Ecological Observatory Network, Battelle, Boulder, CO, USA., 14 de 10 de 2016. [Citado em: 11 de 05 de 2020.] <https://www.neonscience.org/lidar-basics>.

NOAA. 2020. oceanservice.noaa.gov. *National Ocean Service*. [Online] National Oceanic and Atmospheric Administration - U.S. Department of Commerce , 15 de 04 de 2020. [Citado em: 10 de 05 de 2020.] <https://oceanservice.noaa.gov/facts/lidar.html>.

Nogueira, Ana Sofia Silva. 2015. *Avaliação de rodeiras de pavimentos rodoviários com recurso a varrimento laser.* Covilhã : Universidade da Beira Interior, Dissertação de mestrado, 2015.

Peck, Roxy, Olsen, Chris e Devore, Jay. 2008. *Introduction to statistics and data analysis* . Australia : Belmont, CA: Thomson Brooks/Cole, 2008.

Ragnoli, Antonella, Blasiis, Maria Rosaria de e Benedetto, Alessandro Di. 2018. *Pavement distress detection methods: A review, Infrastructures.* 1-19. 2018. 1-19.

ROMDAS, System. 2016. *ROMDAS System Overview.* 8C Bentinck Street, New Lynn, Auckland 0600, New Zealand : Data Collection Ltd, 2016.

—. romdas.com/. *ROMDAS System*. [Online] ROad Measurement Data Acquisition System. [Citado em: 2 de 11 de 2019.]

—. 2018. www.romdas.com. *ROMDAS: Providers of Innovative Technology for Measuring and Managing Roads*. [Online] Data Collection Ltd, 13 de Julho de 2018. [Citado em: 2 de 11 de 2019.] <https://romdas.com/romdas-system.html>.

Sá, Paulo. 1968. *Elementos de Estatística* . Porto Alegre : Editora Globo S. A., 1968.

Santos, Bertha, Almeida, Pedro G. e Manganinho, Leonor. 2019. *Data Collection Methodology to Asses Road Pavement Condition Using GNSS, Video Image and GIS.* in: IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.. Institute of Physics Publishing : s.n., 2019.

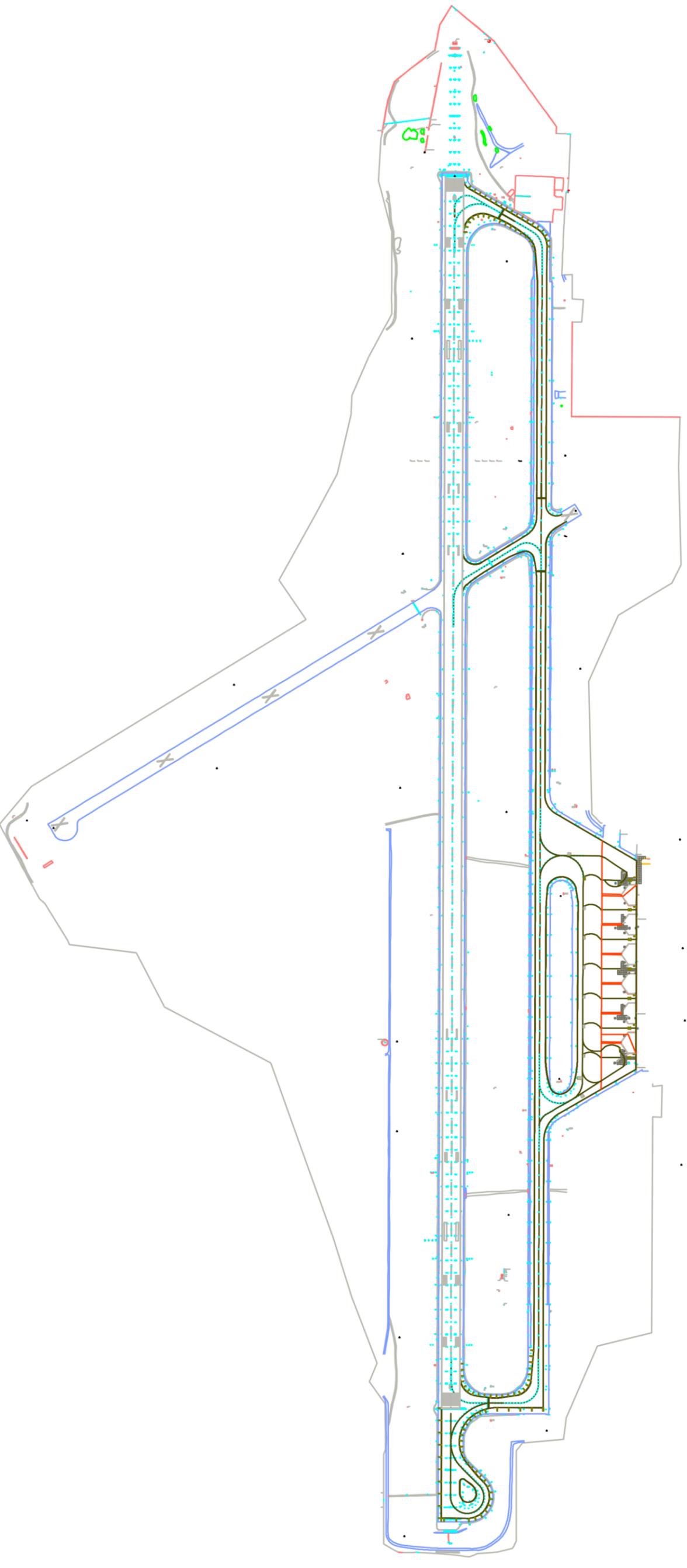
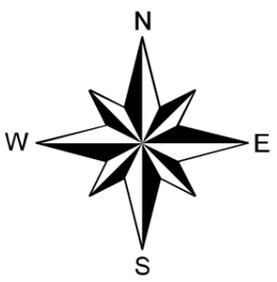
Santos, Luis Picado e Ferreira, Adelino. 2006. *Estruturação de um Sistema de Gestão de Pavimentos para uma Rede Rodoviária de Carácter Nacional.* Portugal : s.n., 2006.

- Shahin, M. Y. 2005.** *Pavement management for airports, roads and park-ing lots.* New York : 2nd Ed., Springer , 2005.
- Silva, Anisa. 2013.** *Sistema de Gestão de Segurança Operacional nos Aeroportos de Cabo Verde. Implementação da Fase II - Gestão de Risco.* Covilhã : Universidade da Beira Interior, Dissertação de Mestrado, 2013.
- SPSS. 2017.** *IBM SPSS Statistics . Version 25.0.* Armonk, NY. : s.n., 2017.
- TRB. 2011.** *Common Airport Pavement Maintenance Practices.* Federal Aviation Administration, Washington D.C., U.S.A. : Airport Cooperative Research Program. Transportation Research Board. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine., 2011.
- . **2008.** *Implementation of an Airport Pavement Management System.* Transportation Reserch Circular number E - C127 : Transportation Reserch Board, 2008.
- Triola, Mario F. 2013.** *Introdução à estatística: atualização da tecnologia.* Rio de Janeiro : LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda. , 2013.
- U. S. Army Corps of Engineer. 2014.** *User Manual, PAVER Version 7.0, Pavement Management System.* U.S. : U.S. Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, Construction Engineering Research Laboratory, 2014.
- U.S. Army Corps of Engineer. 2009.** *Concrete Surfaced Airfields: Paver Distress Identification Manual.* Champaign : Engineering Research and Development Center, Construction Engineering Research Laboratory, 2009.
- U.S. Army Corps of Engineers. 2009.** *Asphalt Surfaced Airfields: Paver Distress Identification Manual.* Champaign : Army Engineering Research and Development Center- Construction Engineering Research Laboratory, 2009.
- Unmanned Systems Technology, r.** www.unmannedsystemstechnology.com/. *UNMANNED SYSTEMS TECHNOLOGY.* [Online] [Citado em: 25 de 10 de 2019.]
- W.DOT. 2019.** *Washington Airport Pavement Management System Pavement Management Manual.* Washington : s.n., 2019. vol. 98101, no. 206..
- Yen, Kin S., Ravani, Bahram e Lasky, Ty A. 2011.** *LiDAR for Data Efficiency.* Davis, California : AHMCT Research Center - UCD Dept. of Mechanical & Aerospace Engineering , 2011.

8. Anexos

- I. Planta do "Lado Ar" do Aeroporto Internacional Amílcar Cabral
- II. Segmentação da rede de pavimentos do Aeroporto Internacional Amílcar Cabral
- III. Localização das unidades de amostras inspecionadas
- IV. Representação gráfica do PCI do levantamento tradicional (a pé)
- V. Representação gráfica do PCI do levantamento em veículo
- VI. Curvas de distribuição dos dados de densidade da degradação "Pele de Crocodilo"
- VII. Curvas de distribuição dos dados de densidade da degradação "Reparações e Cortes Técnicos"
- VIII. Curvas de distribuição dos dados de densidade da degradação "Desagregação Superficial do Agregado"
- IX. Curvas de distribuição dos dados de densidade da degradação "Desagregação Superficial do Mástique em Misturas Betuminosas Densas"

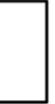
Anexo I - Planta do “Lado Ar” do Aeroporto Internacional Amílcar Cabral



Adaptado da dissertação intitulada “ Sistema de Gestão de Pavimentos Aeroportuários para Cabo Verde” (Lima, 2016).

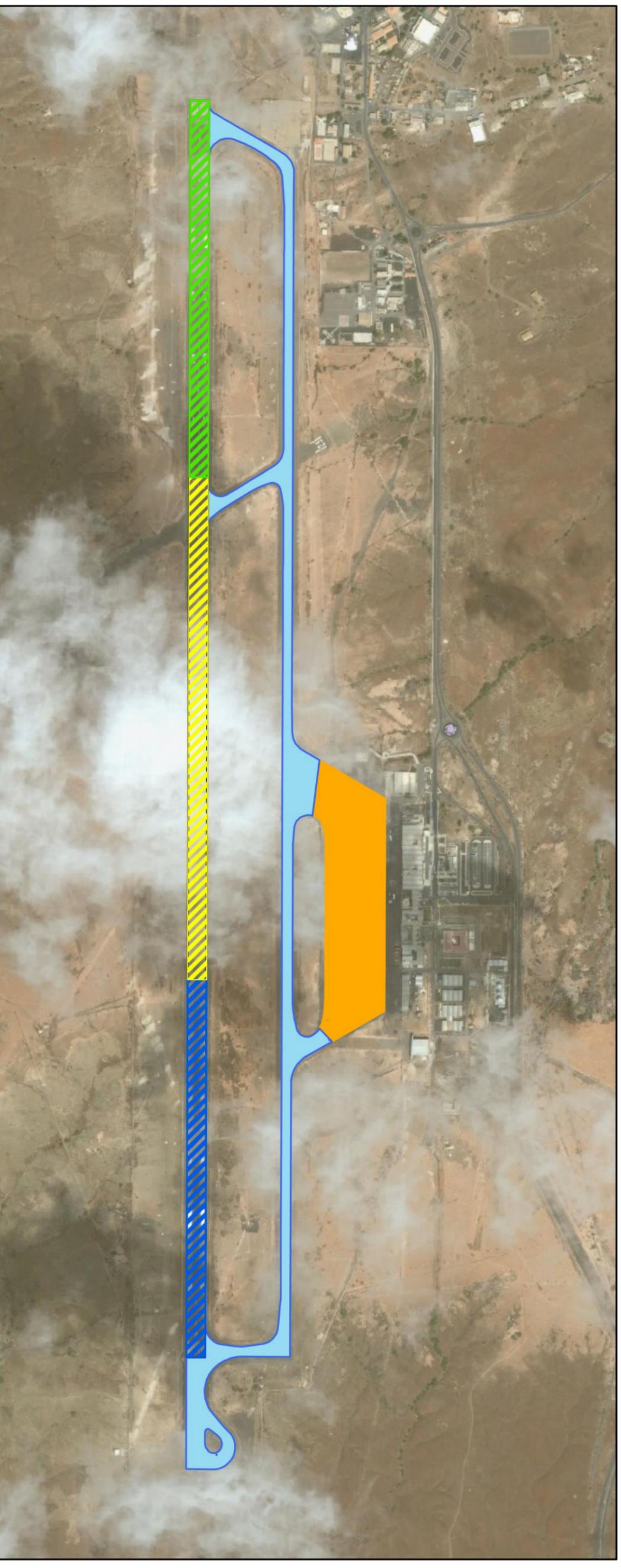
Anexo II - Segmentação do Aeroporto Internacional Amílcar Cabral

Legenda:

-  Secção A - SIDR01SA
-  Secção B - SIDR01SB
-  Secção C - SIDR01SC
-  Apron - SIDAPR
-  Runway - SIDR01
-  Taxiway - SIDTWY



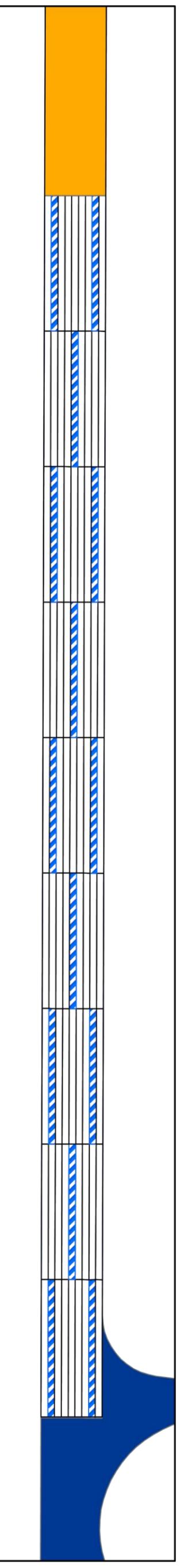
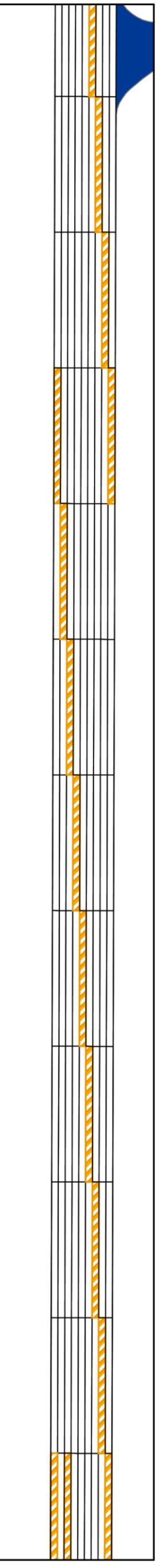
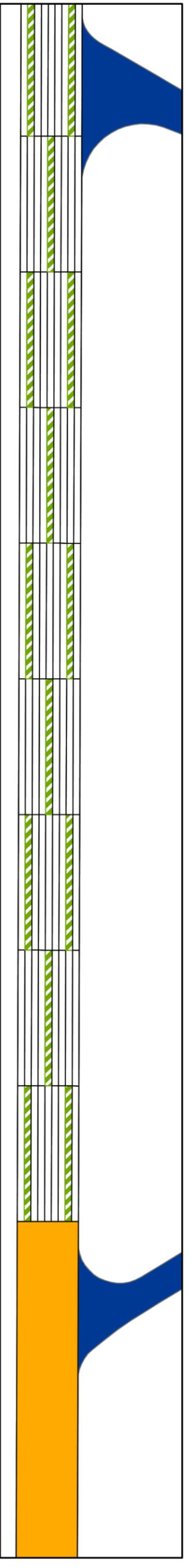
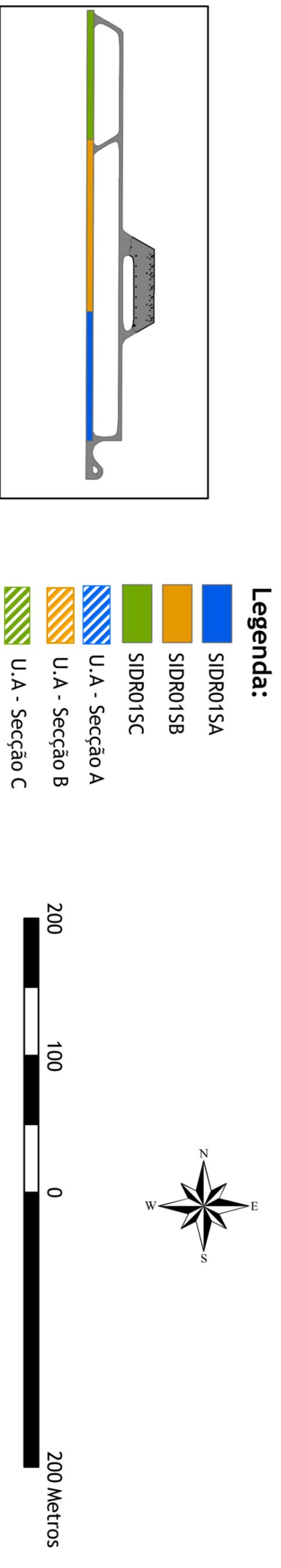
0 100 200 400 600 800
Metros



Adaptado da dissertação intitulada “ Sistema de Gestão de Pavimentos Aeroportuários para Cabo Verde” (Lima, 2016)

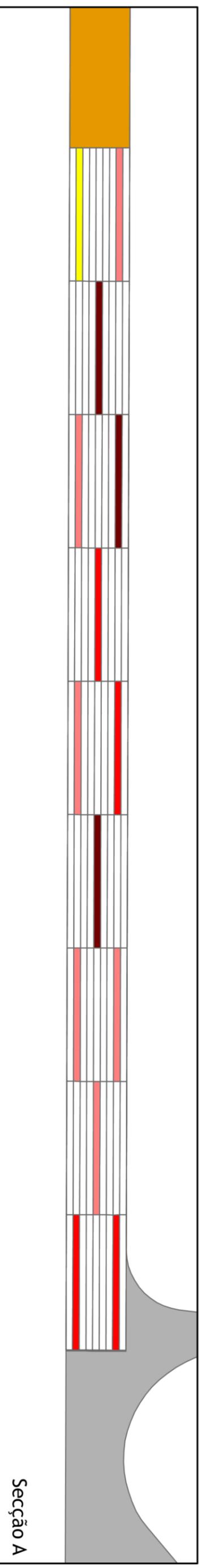
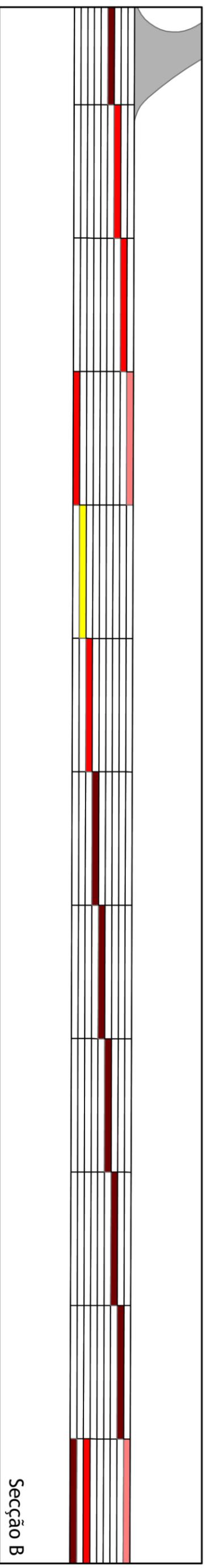
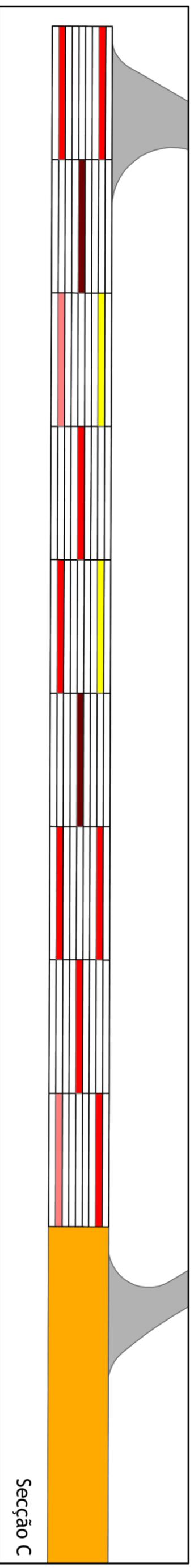
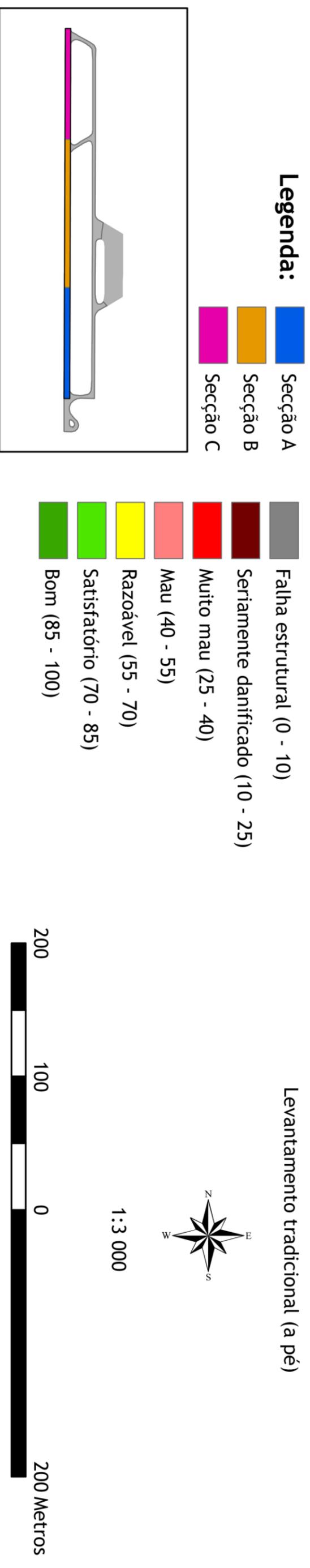
Anexo III - Unidades de Amostra Inspecionadas

Secções A, B e C



Anexo IV - Representação Gráfica do PCI

Levantamento tradicional (a pé)



Anexo V - Representação Gráfica do PCI

Levantamento com veículo equipado



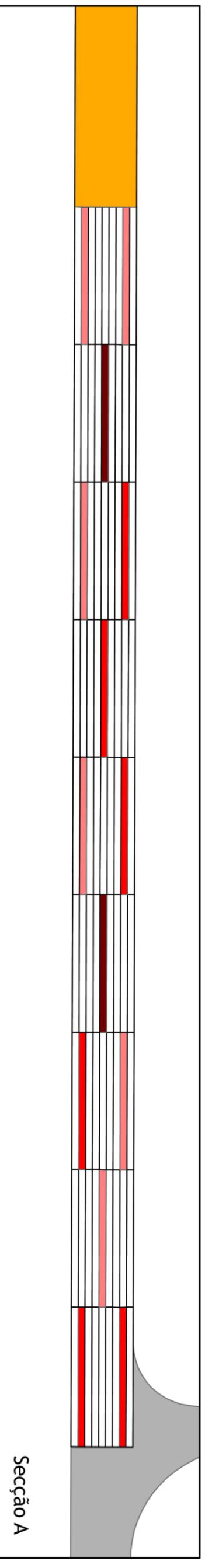
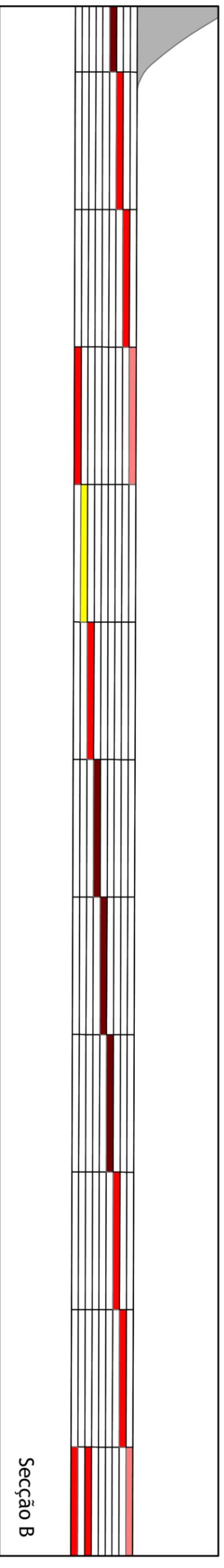
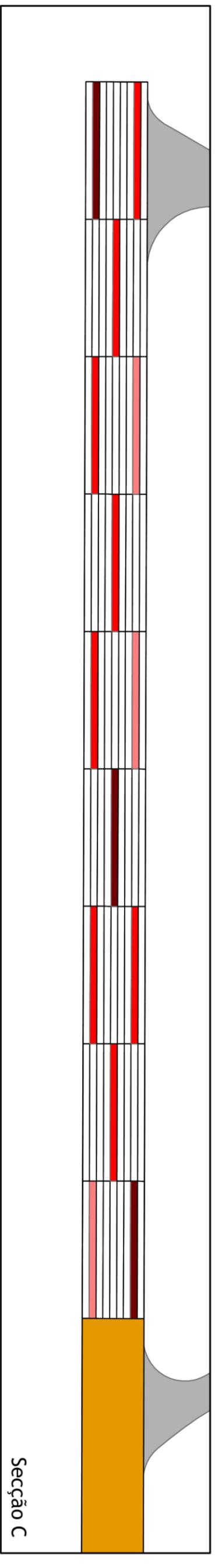
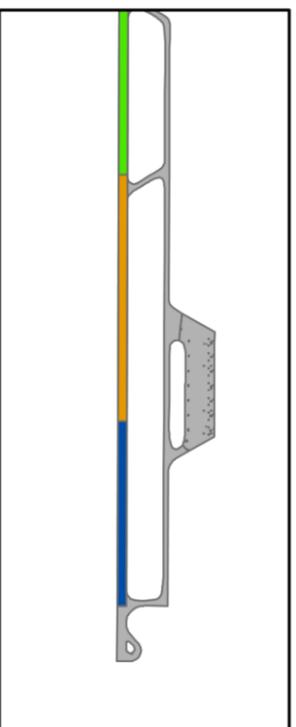
1:3 000



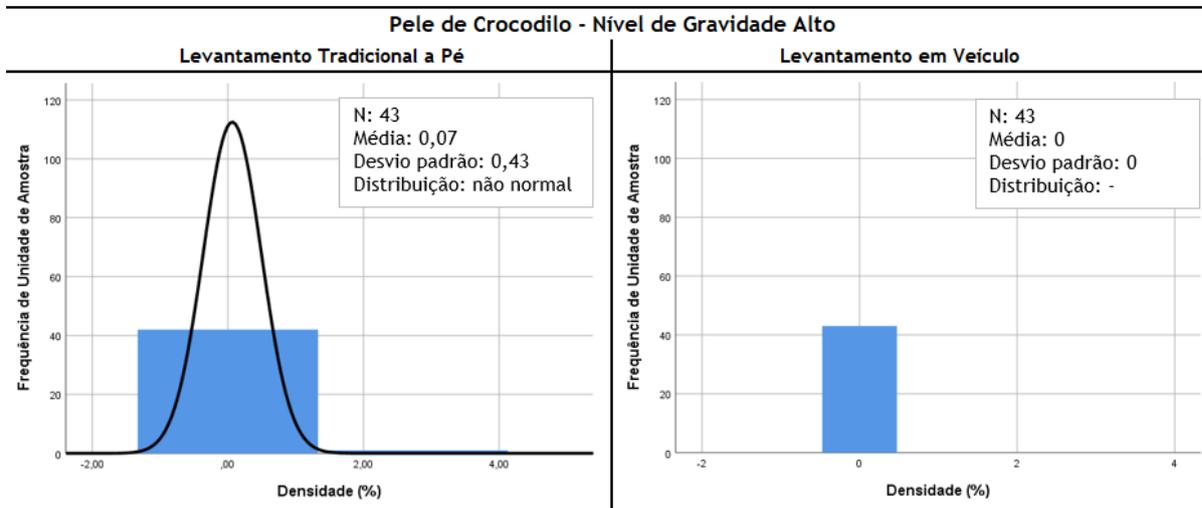
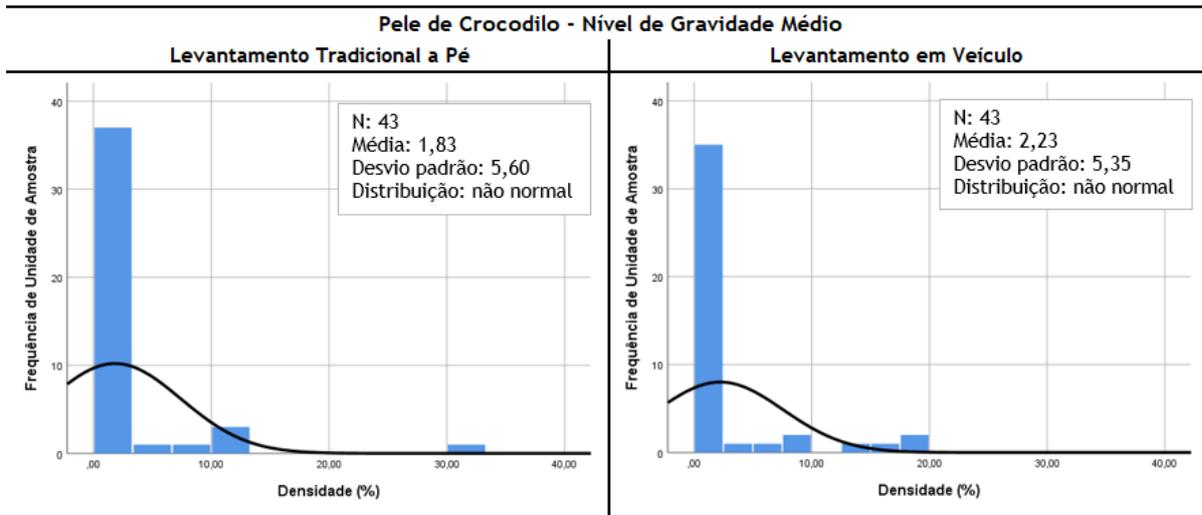
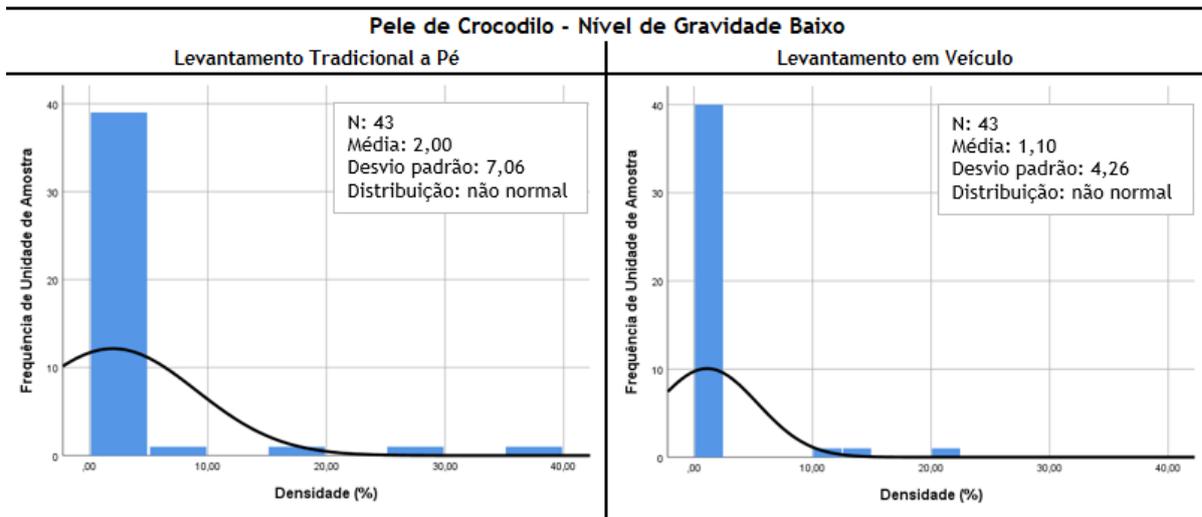
Legenda:

- Secção A
- Secção B
- Secção C

- Falha estrutural (0 - 10)
- Serriamente danificado (10 - 25)
- Muito mau (25 - 40)
- Mau (40 - 55)
- Razoável (55 - 70)
- Satisfatório (70 - 85)
- Bom (85 - 100)

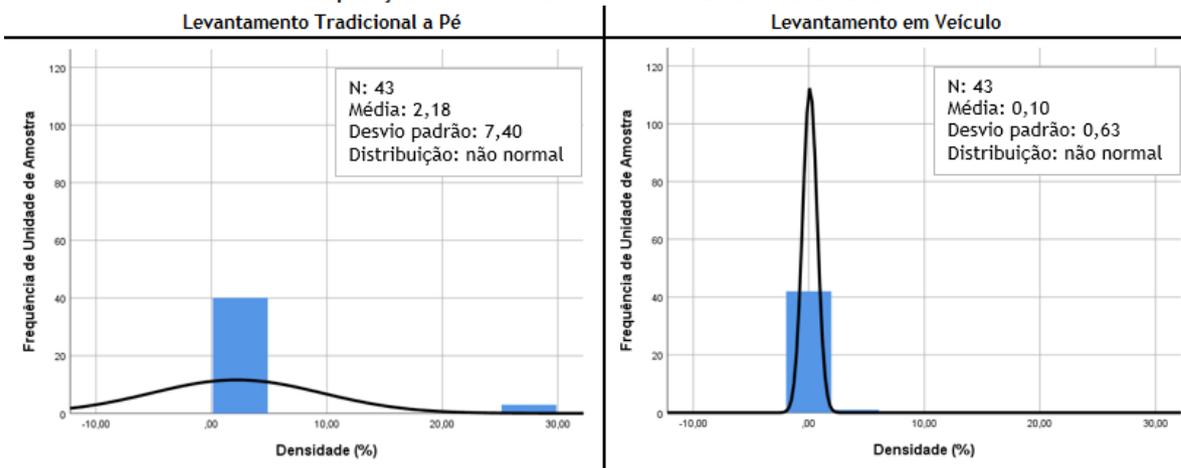


Anexo VI - Curvas de distribuição dos dados de densidade da degradação "Pele de Crocodilo"

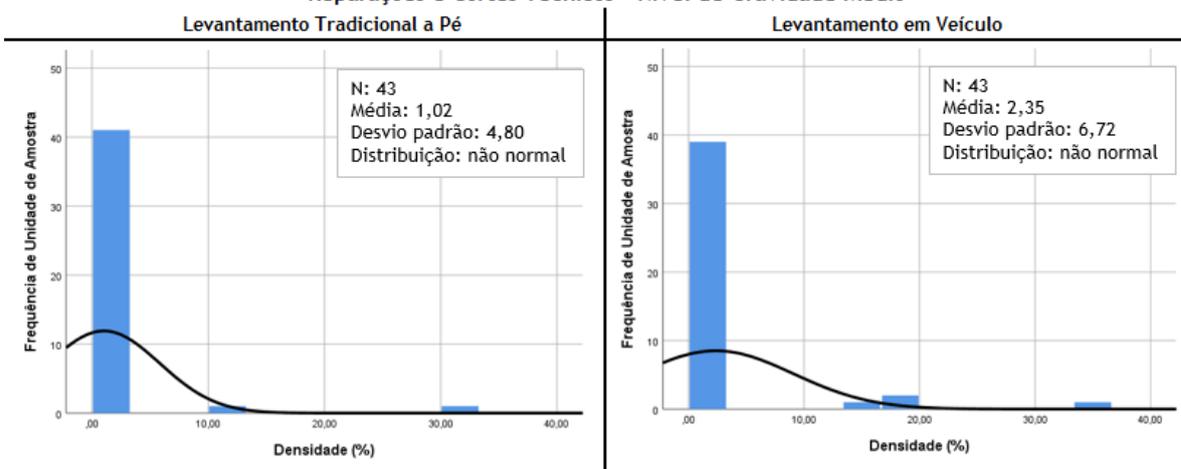


Anexo VII - Curvas de distribuição dos dados de densidade da degradação “Reparações e Cortes Técnicos”

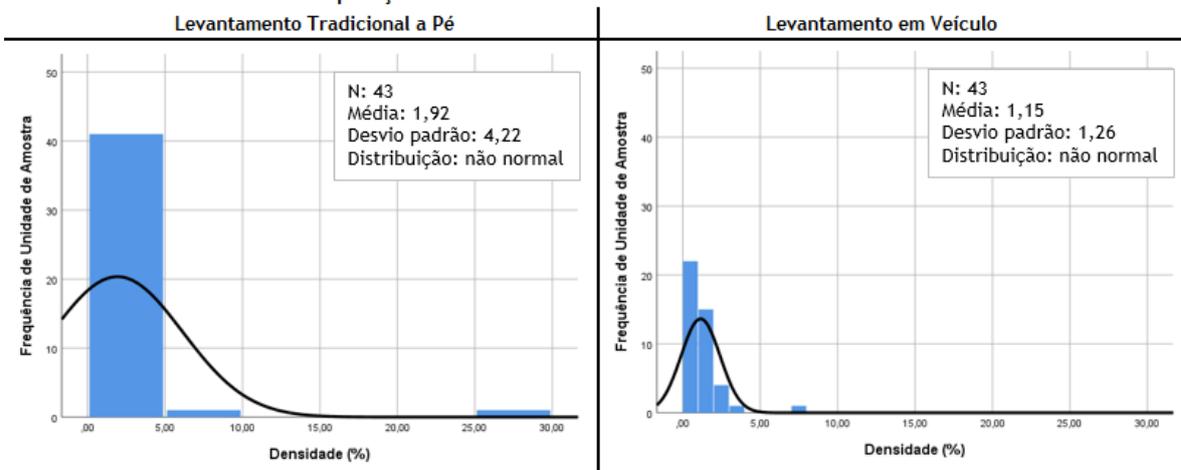
Reparações e Cortes Técnicos - Nível de Gravidade Baixo



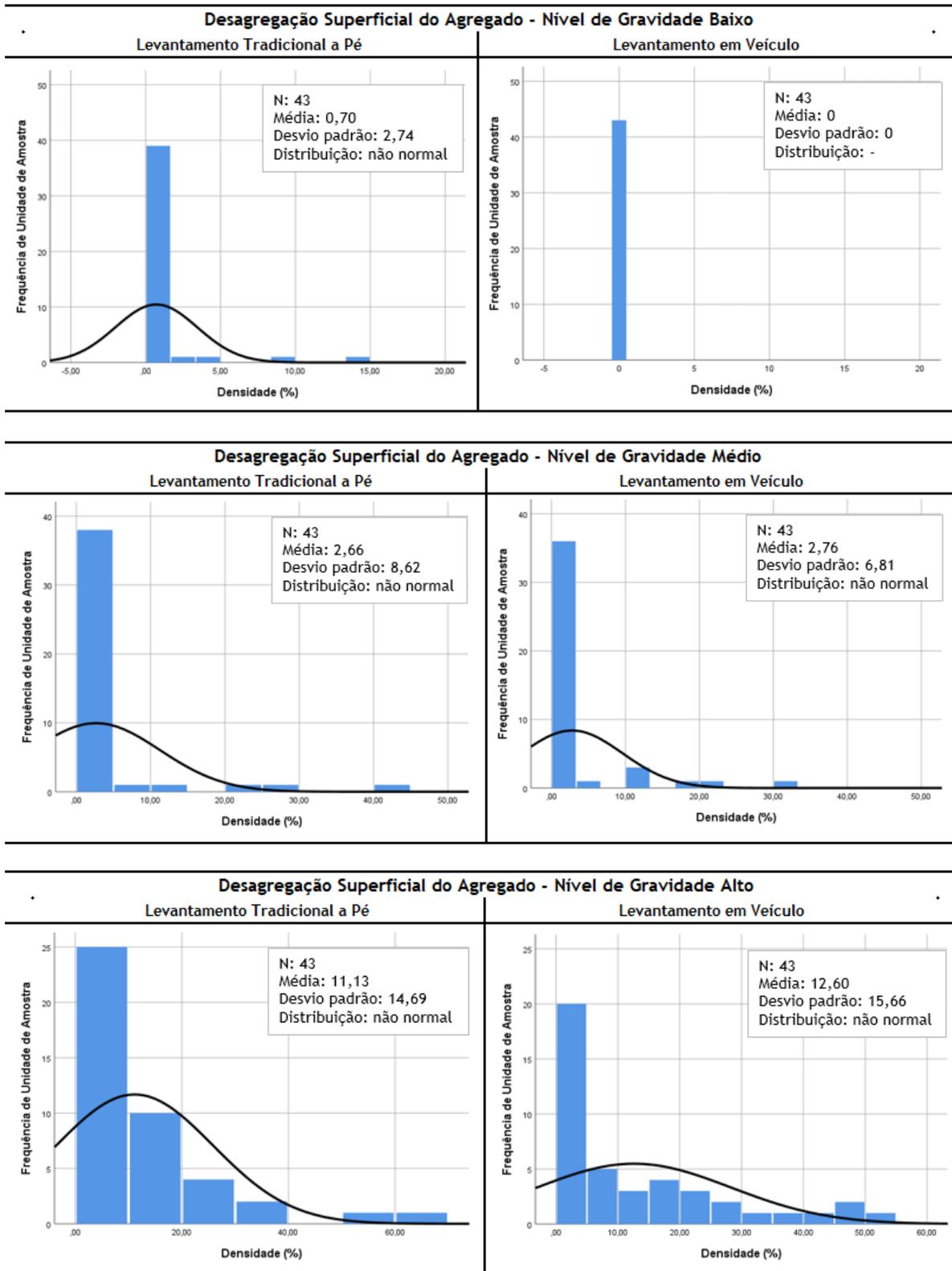
Reparações e Cortes Técnicos - Nível de Gravidade Médio



Reparações e Cortes Técnicos - Nível de Gravidade Alto



Anexo VIII - Curvas de distribuição dos dados de densidade da degradação “Desagregação Superficial do Agregado”



Anexo IX - Curvas de distribuição dos dados de densidade da degradação “Desagregação Superficial do Mástique em Misturas Betuminosas Densas”

