

MARTIM BARBOSA FERREIRA

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

AVANÇOS NA AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS. CLASSIFICAÇÃO ESTRUTURAL E AVALIAÇÃO DAS POTENCIALIDADES DA MONITORIZAÇÃO REMOTA

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL – PERFIL DE ESTRUTURAS

Universidade NOVA de Lisboa
Setembro, 2025

AVANÇOS NA AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS. CLASSIFICAÇÃO ESTRUTURAL E AVALIAÇÃO DAS POTENCIALIDADES DA MONITORIZAÇÃO REMOTA

MARTIM BARBOSA FERREIRA

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Orientadora: Simona Fontul

Professora Auxiliar Convidada, Universidade NOVA de Lisboa

Coorientadora: Dora Roque

Investigadora Auxiliar, Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Júri:

Presidente: Ildi Cismasiu

Professora Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

Arguente: Rui Alexandre Lopes Baltazar Micaelo

Professor Associado, Universidade NOVA de Lisboa

Orientador: Simona Fontul

Professora Auxiliar Convidada, Universidade NOVA de Lisboa

Avanços na Avaliação de Pavimentos Aeroportuários. Classificação estrutural e avaliação das potencialidades da monitorização remota

Copyright © Martim Barbosa Ferreira, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à Professora Simona Fontul, orientadora da tese, pelo apoio, motivação e disponibilidade constantes ao longo de todo o trabalho desenvolvido, bem como pelas orientações fundamentais que contribuíram de forma decisiva para a concretização desta dissertação. Agradeço também à Doutora Dora Roque, coorientadora da tese, pelo apoio crucial no desenvolvimento do segundo caso de estudo.

Agradeço, ainda, ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) por me ter acolhido durante o período de realização desta dissertação e por ter disponibilizado os recursos necessários à sua execução. Agradeço, em particular, ao projeto de investigação europeu “Connected and Adaptive Maintenance for Safer Urban and Secondary Roads” (CAMBER), no âmbito do qual foi possível enquadrar e desenvolver grande parte deste trabalho. Agradeço, igualmente ao Projeto de investigação do LNEC, Prescriptive Maintenance for Transport Infrastructures (PREMATI) e também à operação Lisboa2030-FEDER-01317300 – ID4CH - *Infraestrutura digital para a conservação e divulgação do património* apoiada pelos programas Lisboa2030, FEDER, Portugal 2030 e pela União Europeia, pela disponibilização de meios de suporte à presente dissertação.

Quero também expressar o meu reconhecimento à entidade aeroportuária pela disponibilização de dados essenciais, sem os quais não teria sido possível desenvolver um dos estudos de caso incluídos nesta dissertação.

Dirijo ainda um agradecimento especial a todos os colegas e colaboradores do LNEC que, de diferentes formas, me apoiaram no decurso deste trabalho. Entre eles, a Inês, o Hugo, o Rui, o António e a Doutora Maria João Henriques, pela colaboração prática e pela disponibilidade demonstrada sempre que foi necessário.

Agradeço igualmente à plataforma de inteligência artificial *Chat Generative Pre-trained Transformer* – ChatGPT, desenvolvida pela OpenAI, que contribuiu para melhorar a clareza e o rigor linguístico desta dissertação.

Finalmente, um agradecimento muito sentido aos meus pais, pelo apoio incondicional, paciência e incentivo ao longo de todo este percurso, que foram fundamentais para a concretização deste objetivo.

RESUMO

Os pavimentos aeroportuários constituem elementos estruturais críticos para a segurança e eficiência das operações aéreas, estando sujeitos a solicitações intensas e a um processo contínuo de degradação. A sua avaliação estrutural assume, por isso, uma relevância estratégica, tanto para assegurar a integridade das infraestruturas como para otimizar os planos de manutenção e prolongar a sua vida útil. Tradicionalmente, este processo tem-se apoiado no método *Aircraft Classification Number/Pavement Classification Number* (ACN/PCN), entretanto substituído pelo sistema *Aircraft Classification Rating/Pavement Classification Rating* (ACR/PCR) que introduz critérios mecanicistas e assegura maior rigor na análise da interação entre aeronaves e pavimentos.

A presente dissertação centra-se no estudo da avaliação estrutural de pavimentos aeroportuários, explorando, por um lado, a aplicação do software *FAA Rigid and Flexible Iterative Elastic Layered Design* (FAARFIELD) como ferramenta de cálculo de PCR e de simulação da evolução estrutural, e, por outro, o potencial de tecnologias avançadas de monitorização remota. O primeiro caso de estudo incidiu sobre a pista principal de um aeroporto internacional, comparando o seu comportamento estrutural entre os anos de 2000 e 2024 através da integração de ensaios não destrutivos, do modelo linear elástico *Bitumen Stress Analysis in Roads* (BISAR) e de simulações no FAARFIELD. No segundo caso de estudo, foram testadas metodologias inovadoras de monitorização remota, como interferometria por radar de abertura sintética (InSAR), *Light Detection and Ranging* (LiDAR), veículos aéreos não tripulados (drones) e georadar, aplicadas em ambiente rodoviário, com o objetivo de demonstrar a sua possível transposição para o contexto aeroportuário.

Os resultados obtidos para o primeiro caso de estudo, confirmam que o FAARFIELD constitui uma ferramenta robusta e coerente para a avaliação e dimensionamento de pavimentos aeroportuários, alinhada com as práticas internacionais. Em paralelo, o segundo

caso de estudo mostra que a integração de metodologias de monitorização remota, no futuro, poderá contribuir para diagnósticos mais precisos e obtidos em tempo útil, suportando uma gestão mais sustentável das infraestruturas, reduzindo custos de manutenção e reforçando os níveis de segurança operacional.

Palavas chave: Avaliação estrutural, Pavimentos aeroportuários, ACN/PCN, ACR/PCR, FAARFIELD, Monitorização remota.

ABSTRACT

Airport pavements are critical structural elements for the safety and efficiency of air operations, being subject to intense stress and a continuous process of degradation. Therefore, their structural assessment is of strategic importance, both to ensure the integrity of the infrastructure and to optimize maintenance plans and extend their useful life. Traditionally, this process has been based on the Aircraft Classification Number/Pavement Classification Number (ACN/PCN) method, but this has now been replaced by the Aircraft Classification Rating/Pavement Classification Rating (ACR/PCR) system, which introduces mechanistic criteria ensuring greater accuracy in the analysis of the interaction between aircraft and pavements.

This dissertation focuses on the structural assessment of airport pavements, exploring, on the one hand, the application of FAA Rigid and Flexible Iterative Elastic Layered Design (FAARFIELD) software as a tool for calculating PCR and simulating structural evolution and, on the other hand, the potential of advanced remote monitoring technologies. The first case study examined the main runway of an international airport and compared its structural behavior between 2000 and 2024 by integrating non-destructive tests, the Bitumen Stress Analysis in Roads (BISAR) linear elastic model, and FAARFIELD simulations. The second case study tested innovative remote sensing methodologies, such as Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR), Light Detection and Ranging (LiDAR), Unmanned Aerial Vehicles or drones (UAV) and GeoRadar, in a road environment, with the aim of demonstrating their possible application to the airport context.

The results of the first case study confirmed that FAARFIELD is a robust and consistent tool for assessing and designing airport pavements, in line with international practices. The second case study showed that the integration of remote monitoring methodologies, in the future, could provide more accurate and timely diagnostics, thus supporting more sustainable

infrastructure management, reducing maintenance costs, and enhancing operational safety levels.

Keywords: Structural evaluation, Airport pavements, ACN/PCN, ACR/PCR, FAARFIELD, Remote monitoring.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Organização do documento	3
2	AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS	5
2.1	Conceitos básicos associados aos principais componentes	5
2.2	Composição e estrutura de um pavimento aeroportuário	6
2.2.1	Pavimentos Flexíveis	6
2.2.2	Pavimentos Rígidos	7
2.2.3	Pavimentos Semi-Rígidos	8
2.3	Metodologia de avaliação	10
2.3.1	Enquadramento	10
2.3.2	Ensaio de carga com defletómetro de impacto	10
2.3.3	Medição da espessura das camadas com georadar	12
2.3.4	Divisão em zonas de comportamento estrutural homogéneo	14
2.4	Critérios de dimensionamento e ruína	15
2.4.1	Enquadramento	15
2.4.2	Fendilhamento por fadiga em camadas betuminosas	15

2.4.3	Fendilhamento por fadiga em camadas de betão	16
2.4.4	Deformação permanente no solo de fundação	17
2.5	Nova metodologia de Classificação Estrutural Aeroportuária	17
2.5.1	Metodologia anterior (ACN/PCN).....	17
2.5.2	Metodologia recente (ACR/PCR).....	19
2.5.3	Comparação ACN/PCN vs. ACR/PCR.....	20
2.5.4	Programa de cálculo FAARFIELD	21
3	CLASSIFICAÇÃO ESTRUTURAL ACR/PCR. CASO DE ESTUDO	25
3.1	Introdução do caso de estudo	25
3.2	Metodologia e Ferramentas de Avaliação	26
3.2.1	Levantamento de 2000 – Estudo de Referência	26
3.2.2	Levantamento Recente.....	27
3.2.3	Critérios de Dimensionamento e Ruína	27
3.3	Caracterização da Pista (Dados Históricos)	27
3.4	Informações Disponíveis relativamente ao PCN da Pista.....	29
3.5	Dados de Tráfego	30
3.5.1	Pré-processamento da Informação de Tráfego para Integração no FAARFIELD.....	30
3.5.2	Tráfego Considerado para o Caso de Estudo	33
3.6	Modelos Estruturais dos Pavimentos.....	35
3.6.1	Modelo de Referência (Ano 2000)	35
3.6.2	Modelo Pós-Reforço	36
3.7	Modelação e Resultados do FAARFIELD.....	36
3.7.1	Limitações na definição do modelo estrutural FAARFIELD.....	36
3.7.2	Cenários adotados para modelos estruturais no FAARFIELD	38
3.7.3	Modelação Estrutural do ano de 2000	39
3.7.4	Modelação Estrutural Pós Reforço	44
3.8	Avião Crítico.....	47

3.9	Síntese dos Resultados FAARFIELD.....	49
3.10	Modelo Linear Elástico.....	49
3.10.1	Processamento de dados no BISAR.....	49
3.10.2	Análise dos dados obtidos com o BISAR.....	51
3.10.3	Síntese dos Resultados Obtidos com o BISAR.....	53
3.11	Estudo de Sensibilidade aos Critérios de Dimensionamento.....	54
3.11.1	Enquadramento.....	54
3.11.2	Critério de Fadiga.....	54
3.11.3	Critério de Deformação Permanente.....	56
3.11.4	Cálculo do PCR no FAARFIELD.....	59
3.11.5	Considerações finais do Estudo de Sensibilidade.....	59
3.12	Análise Comparativa Final.....	60
3.13	Considerações finais.....	62
4	MONITORIZAÇÃO REMOTA EM AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS.....	65
4.1	Enquadramento.....	65
4.2	Interferometria por Radar de Abertura Sintética (InSAR).....	65
4.2.1	Deteção de movimentos verticais com InSAR.....	65
4.2.2	Princípios físicos da interferometria SAR.....	66
4.2.3	Técnicas de <i>Persistent Scatterer Interferometry</i> (PSI).....	67
4.2.4	Vantagens e limitações.....	68
4.3	<i>Light Detection and Ranging</i> (LiDAR).....	69
4.3.1	Funcionamento da tecnologia LiDAR.....	69
4.3.2	Componentes dos sistemas LiDAR.....	70
4.3.3	Tipos de sistemas LiDAR.....	70
4.3.4	Vantagens e Limitações.....	71
4.3.5	Aplicações em infraestruturas de transporte.....	72
4.4	Levantamento com Drones para Inspeção de Estradas (UAV).....	74

4.4.1	Enquadramento	74
4.4.2	Planeamento do Voo	74
4.4.3	Aquisição de Imagens	75
4.4.4	Processamento e Análise dos Dados.....	75
4.4.5	Vantagens e Limitações	76
5	MONITORIZAÇÃO REMOTA. CASO DE ESTUDO.....	77
5.1	Avaliação tradicional de pavimentos e técnicas remotas.....	77
5.2	Troço experimental para aplicação de tecnologias remotas	78
5.3	InSAR.....	79
5.4	Drone (UAV).....	80
5.5	LiDAR.....	82
5.6	GeoRadar (<i>Ground Penetrating Radar</i>).....	84
5.7	Análise de uma anomalia localizada: fendilhamento em “pele de crocodilo”	86
5.7.1	Enquadramento e caracterização da anomalia	86
5.7.2	Resolução dos dados e comparabilidade entre LiDAR e UAV	86
5.7.3	Análise do perfil longitudinal.....	88
5.7.4	Análise do perfil transversal	88
5.7.5	Síntese.....	89
5.8	Síntese comparativa das tecnologias aplicadas	90
6	CONCLUSÕES	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Estrutura de um pavimento flexível. Fonte: Fontul (2023).....	7
Figura 2.2 - Estrutura de um pavimento rígido. Fonte: Fontul (2023).	8
Figura 2.3 - Estrutura de um pavimento semi-rígido. Fonte: Fontul (2023).....	9
Figura 2.4 - Deflectómetro de Impacto	10
Figura 2.5 - Deflectómetro de impacto: elementos. Fonte: adaptado de FAA (2011).	11
Figura 2.6 - Deflectómetro de Impacto: sensores e exemplo de deformação observada. Fonte: Fontul (2023).....	11
Figura 2.7 - Georadar no terreno (Caso de Estudo 2)	12
Figura 2.8 - Funcionamento do georadar. Fonte: Fontul (2023).....	12
Figura 2.9 - Computador ligado e a receber informação do georadar (Caso de Estudo 2).....	13
Figura 2.10 - Exemplo de elementos detetados pelo georadar. Fonte: Fontul (2023)	13
Figura 2.11 - Interface principal do software FAARFIELD.	22
Figura 2.12 - Exemplo de gráfico do cálculo do fator de dano cumulativo no FAARFIELD. .	22
Figura 3.1 - Evolução do número de artigos científicos publicados e número de citações por ano, no período entre 1980 e 2025, com os termos “airport” e “pavement” no título.	26
Figura 3.2 - Representação simplificada da pista e das duas zonas estruturais.....	28
Figura 3.3 - Composição estrutural da pista nas zonas 1 e 2, sem a última camada de 2017. Fonte: Entidade aeroportuária.....	29
Figura 3.4 - Exemplo de informação utilizada para três tipologias de aeronaves	30
Figura 3.5 - Modelo estrutural de um pavimento aeroportuário	32
Figura 3.6 - Limitação do software FAARFIELD relativa à espessura da camada de desgaste	37
Figura 3.7 - Limitações nos materiais disponíveis e módulo de elasticidade	38

Figura 3.8 - Modelo estrutural do pavimento modelado com o FAARFIELD, para a zona 1, com base na abordagem implícita (ano 2000).....	40
Figura 3.9 - Modelo estrutural do pavimento modelado com o FAARFIELD, para a zona 1, no ano 2000, com base na abordagem realista.	41
Figura 3.10 - Modelo estrutural do pavimento modelado com o FAARFIELD para a zona 2, no ano 2000, com base na abordagem implícita	42
Figura 3.11 - Modelo estrutural do pavimento modelado com o FAARFIELD para a zona 2, no ano 2000, com base na abordagem realista.	43
Figura 3.12 - Modelo estrutural do pavimento modelado com o FAARFIELD para a zona 1, pós reforço, com base na abordagem implícita.	44
Figura 3.13 - Modelo estrutural do pavimento modelado com o FAARFIELD para a zona 1, pós reforço, com base na abordagem realista.....	45
Figura 3.14 - Modelo estrutural do pavimento modelado com o FAARFIELD para a zona 2, pós reforço, com base na abordagem implícita.	46
Figura 3.15 - Modelo estrutural do pavimento modelado com o FAARFIELD para a zona 2, pós reforço, com base na abordagem realista.....	47
Figura 3.16 - (A) Configuração do trem principal (painel esquerdo, FAARFIELD) e (B) aspecto do avião crítico.....	48
Figura 3.17 - Exemplo de dados de entrada no programa BISAR das características das camadas, da carga aplicada sobre a superfície do pavimento e dos pontos onde se pretende determinar o critério de ruína.....	50
Figura 3.18 - Parâmetros e valores do ACN do avião crítico A330-300 (Fonte: Transport Canada, Technical Evaluation Engineering).	51
Figura 3.19 - A: Estrutura do pavimento considerada para o ano de 2000 na Zona 1; e B: Estrutura do pavimento considerada para o ano de 2024 (após reforço) na Zona 1.	55
Figura 3.20 - Estrutura do pavimento na Zona 1 considerada para o ano de 2000 (A) e após reforço (B).	57
Figura 4.1 - Sensor LiDAR utilizado no levantamento em estrada	71
Figura 4.2 - Alvo de referência com duas partes brancas e duas partes pretas, utilizado para georreferenciação.....	71
Figura 4.3 - Disposição do sensor LiDAR e do alvo na estrada durante o processo de aquisição de dados.....	73
Figura 4.4 - Drone utilizado no caso de estudo.....	74

Figura 4.5 - Comando remoto do drone com ecrã que mostra a estrada em tempo real	75
Figura 5.1 - Velocidades, em milímetros por ano, obtidas a partir do InSAR no trajeto de autocarro e identificação do troço estudado.....	79
Figura 5.2 - Velocidades, em milímetros por ano, obtidas a partir do InSAR no troço em estudo, destacando zonas com potenciais assentamentos diferenciais e gráfico com a evolução entre 2019 e 2024.	80
Figura 5.3 - Ortofotomosaicos da secção estudada gerados com recurso a UAV com resoluções de (A) 3,4 mm e (B) 5 mm.....	81
Figura 5.4 - Exemplos de anomalias superficiais detetadas por UAV: (A) fendilhamento em pele de crocodilo e (B) delimitação da zona de reparação, com texturas distintas.....	82
Figura 5.5 - Secção completa LiDAR.....	83
Figura 5.6 - Secção estudada LIDAR	83
Figura 5.7 - Modelo digital de superfície (resolução 5 cm) obtido a partir da nuvem de pontos LiDAR.	83
Figura 5.8 - Orientação de pixels obtida a partir do modelo digital de superfície LiDAR.	84
Figura 5.9 - Exemplo de levantamento obtido com LiDAR: (A) Perfil longitudinal na rodeira externa e (B) Perfil transversal da estrada na zona com fendilhamento em pele de crocodilo.	84
Figura 5.10 - Resultados do GeoRadar no troço estudado, ilustrando a avaliação da estrutura em profundidade.....	85
Figura 5.11 - Exemplo de perfil longitudinal.....	86
Figura 5.12 - A: Traçado do perfil longitudinal para o UAV e LiDAR; e B: Traçado do perfil transversal para o UAV e LiDAR.....	87
Figura 5.13 - Perfis longitudinais obtidos por LiDAR (A) e UAV (B).....	88
Figura 5.14 - Perfis transversais obtidos por LiDAR (A) e UAV (B)	89

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classificação do subleito, baseada no valor do módulo de elasticidade (E).....	19
Tabela 3.1 - Listagem dos oito modelos de aeronaves com mais descolagens	31
Tabela 3.2 - Número de passagens e valores de PCR calculados para diferentes combinações de aviões. A: 8 Aviões mais pesados B: 32 Aviões com mais passagens C: 40 Aviões com mais passagens A + B: 32 Aviões com mais passagens + 8 aviões mais pesados.....	32
Tabela 3.3 - Exemplo de substituição do modelo de aeronave GLEX presente nos dados obtidos através da entidade aeroportuária pelo Gulfstream V com características muito semelhantes.	33
Tabela 3.4 - Número de descolagens para diferentes modelos de aviões (ou avião similar considerado) no ano 2024. Modelos marcados a amarelo não disponíveis na biblioteca do FAARFIELD.	34
Tabela 3.5 – Camadas, respetiva espessura e módulo de elasticidade da retroanálise (E RA) na Zona 1, no ano 2000.....	35
Tabela 3.6 - Camadas, respetiva espessura e módulo de elasticidade da retroanálise (E RA) na Zona 2, no ano 2000.....	35
Tabela 3.7 - Camadas, respetiva espessura (h) e módulo de elasticidade (E RA) na Zona 1, após reforço.	36
Tabela 3.8 - Camadas, respetiva espessura (h) e módulo de elasticidade (E RA) na Zona 2, após reforço.	36
Tabela 3.9 - Materiais das camadas da pista e a sua correspondência aproximada no FAARFIELD.	38
Tabela 3.10 - Características das camadas FAARFIELD para uma abordagem implícita.....	39
Tabela 3.11 - Características das camadas FAARFIELD para uma abordagem realista	39

Tabela 3.12 - Constituição estrutural da Zona 1 com base na abordagem implícita FAARFIELD no ano 2000, com indicação da espessura (h), módulo de elasticidade da retroanálise (E RA) e módulo de elasticidade de FAARFIELD (E FAA).	40
Tabela 3.13 - Constituição estrutural da Zona 1 com base na abordagem realista FAARFIELD no ano 2000, com indicação da espessura (h), módulo de elasticidade da retroanálise (E RA) e módulo de elasticidade de FAARFIELD (E FAA).	41
Tabela 3.14 - Constituição estrutural da Zona 2 com base na abordagem implícita FAARFIELD no ano 2000, com indicação da espessura (h), módulo de elasticidade da retroanálise (E RA) e módulo de elasticidade de FAARFIELD (E FAA).	42
Tabela 3.15 - Constituição estrutural da Zona 2 com base na abordagem realista FAARFIELD no ano 2000, com indicação da espessura (h), módulo de elasticidade da retroanálise (E RA) e módulo de elasticidade de FAARFIELD (E FAA).	43
Tabela 3.16 - Constituição estrutural da Zona 1 com base na abordagem implícita FAARFIELD na fase pós-reforço, com indicação da espessura (h), módulo de elasticidade da retroanálise (E RA) e módulo de elasticidade de FAARFIELD (E FAA).	44
Tabela 3.17 - Constituição estrutural da Zona 1 com base na abordagem realista FAARFIELD na fase pós-reforço, com indicação da espessura (h), módulo de elasticidade da retroanálise (E RA) e módulo de elasticidade de FAARFIELD (E FAA).	45
Tabela 3.18 - Constituição estrutural da Zona 2 com base na abordagem implícita FAARFIELD na fase pós-reforço, com indicação da espessura (h), módulo de elasticidade da retroanálise (E RA) e módulo de elasticidade de FAARFIELD (E FAA).	46
Tabela 3.19 - Constituição estrutural da Zona 2 com base na abordagem realista FAARFIELD na fase pós-reforço, com indicação da espessura (h), módulo de elasticidade da retroanálise (E RA) e módulo de elasticidade de FAARFIELD (E FAA).	47
Tabela 3.20 - Valores do ACR do avião para todos os cenários avaliados no ano 2000 e pós reforço.	48
Tabela 3.21 - Resultados do PCR e ACR para todos os cenários para o ano 2000.....	49
Tabela 3.22 - Resultados do PCR e ACR para todos os cenários para o ano 2000.....	49
Tabela 3.23 - Cálculo do PCN nas Zona 1 e Zona 2, para o ano 2000.	52
Tabela 3.24 - Cálculo do PCR na Zona 1 e Zona 2 no ano 2000.	52
Tabela 3.25 - Cálculo do PCN na Zona 1 e Zona 2 após reforço.	53
Tabela 3.26 - Cálculo do PCR na Zona 1 e Zona 2 após reforço.....	53
Tabela 3.27 - Resumo dos valores de PCN e PCR para as duas zonas e períodos.	54

Tabela 3.28 - Cálculo do PCN na Zona 1 para o ano 2000. As células marcadas a amarelo indicam o critério de ruína e o respetivo PCN.....	55
Tabela 3.29 - Cálculo do PCR na Zona 1 para o ano 2000. As células marcadas a amarelo indicam o critério de ruína e o respetivo PCR.....	55
Tabela 3.30 - Cálculo do PCN na Zona 1, pós reforço. As células marcadas a amarelo indicam o critério de ruína e o respetivo PCN.	56
Tabela 3.31 - Cálculo do PCR na Zona 1, pós reforço. As células marcadas a amarelo indicam o critério de ruína e o respetivo PCR.....	56
Tabela 3.32 - Cálculo do PCN na Zona 1 no ano 2000. As células marcadas a amarelo indicam o critério de ruína e o respetivo PCN.	57
Tabela 3.33 - Cálculo do PCR na Zona 1 no ano 2000. As células marcadas a amarelo indicam o critério de ruína e o respetivo PCR.....	57
Tabela 3.34 - Cálculo do PCR na Zona 1 no ano 2000. As células marcadas a amarelo indicam o critério de ruína e o respetivo PCR.....	58
Tabela 3.35 - Cálculo do PCR na Zona 1, após reforço. As células marcadas a amarelo indicam o critério de ruína e o respetivo PCR.....	58
Tabela 3.36 - Resumo dos valores de PCN e PCR segundo o critério de fadiga.	59
Tabela 3.37 - Resumo dos valores de PCN e PCR segundo o critério de deformação permanente	60
Tabela 3.38 - Síntese dos valores de PCN para as Zonas 1 e 2.	61
Tabela 3.39 - Síntese de valores de PCR para as Zonas 1 e 2.....	61

SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Official
AC	Advisory Circular
ACN	Aircraft Classification Number
ACR	Aircraft Classification Rating
ALS	Aerial Laser Scanning
BISAR	Bitumen Stress Analysis in Roads
CBR	California Bearing Ratio
CDF	Fator de dano cumulativo (Cumulative Damage Factor)
CW	Continuous Wave
DInSAR	Interferometria SAR diferencial
DMI	Medidor de Distância (Distance Measuring Instrument)
DS	Dispersores distribuídos
DSWL	Derived Single Wheel Load
E	Módulo de elasticidade
EGMS	European Ground Motion Service

FAA	Federal Aviation Administration
FAARFIELD	FAA Rigid and Flexible Iterative Elastic Layered Design
FEM	Finite Element Method
FWD	Deflectómetro de Impacto (Falling Weight Deflectometer)
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPR	Ground Penetrating Radar (Georadar)
GSD	Ground Sampling Distance
ICAO	International Civil Aviation Organization
InSAR	Interferometria por Radar de Abertura Sintética
INS	Inertial Navigation System
k	Módulo de Reação do Solo
LiDAR	Light Detection and Ranging
LOS	Linha de Vista (Line-of-sight)
MLS	Mobile Laser Scanning
PCN	Pavement Classification Number
PCR	Pavement Classification Rating
PS	Dispersores Persistentes (Persistent Scatterers)
PSI	Persistent Scatterer Interferometry
RANSAC	Random Sample Consensus
SfM	Structure-from-Motion
SVM	Support Vector Machines
TLS	Terrestrial Laser Scanning
ToF	Tempo de Voo (Time-of-Flight)
UAV	Veículos Aéreos Não Tripulados (Unmanned Aerial Vehicles)

SÍMBOLOS

D médio	Valor médio das deflexões
DP	Desvio padrão
D85	Percentil 85 da deflexão
E	Módulo de elasticidade (deformabilidade) da mistura betuminosa
ϵ_c	Extensão máxima de compressão admissível no topo da camada de fundação
ϵ_t	Extensão máxima de tração admissível na zona inferior das camadas betuminosas
N	Número admissível de aplicações de carga
V_b	Percentagem volumétrica de betume
ϵ_c	Extensão vertical de compressão admissível no topo da camada de solo de fundação
ϵ_t	Extensão máxima de tração admissível na base das camadas betuminosas
$\sigma_{máx}$, bordo	Tensão máxima admissível na proximidade dos bordos das lajes
$\sigma_{máx}$, centro	Tensão máxima admissível no centro da laje
σ_t	Resistência característica à tração em flexão do betão

INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Os pavimentos aeroportuários são estruturas críticas para a operação segura e eficiente do transporte aéreo, desempenhando um papel central na conectividade global e no desenvolvimento económico e social. Para manter a sua operacionalidade, e das infraestruturas aeroportuárias associadas, é necessário garantir um desempenho estrutural adequado destes pavimentos, perante cargas de elevada magnitude, assegurando simultaneamente a segurança operacional, a continuidade de serviço e a durabilidade ao longo do ciclo de vida.

A avaliação estrutural destes pavimentos, em particular dos pavimentos flexíveis, tem evoluído, em função da crescente complexidade do tráfego aéreo e da evolução das metodologias de engenharia. Entre os aspetos fundamentais desta análise destaca-se a determinação dos critérios de ruína, que constituem a base das abordagens mecanicistas utilizadas em dimensionamento e monitorização. Neste domínio, os sistemas de classificação internacionais desempenham um papel essencial, tendo evoluído recentemente para o sistema *Aircraft Classification Rating/Pavement Classification Rating* (ACR/PCR), mais alinhado com os princípios da engenharia de pavimentos e com as exigências operacionais contemporâneas (FAA, 2022; Brill, 2023b).

O desenvolvimento de ferramentas computacionais, em articulação com ensaios não destrutivos, permitiu reforçar a capacidade de análise estrutural, possibilitando diagnósticos mais robustos e fundamentando intervenções de manutenção e reforço. Contudo, a crescente necessidade de otimização dos recursos e de monitorização em larga escala impulsionou a investigação de metodologias complementares capazes de superar limitações inerentes às

práticas tradicionais. Neste contexto, as tecnologias de monitorização remota assumem particular relevância e a sua aplicação oferece novas possibilidades de recolha e integração de informação, caracterizando-se pela rapidez, abrangência espacial e capacidade de complementaridade com as técnicas convencionais. Estas ferramentas emergem como instrumentos promissores para a gestão preditiva e sustentável de pavimentos em infraestruturas críticas de transporte.

O presente estudo insere-se nesta confluência entre metodologias tradicionais e tecnologias inovadoras, procurando demonstrar como a articulação entre diferentes abordagens potencia a precisão das avaliações estruturais e sustenta decisões estratégicas de manutenção, reforçando a resiliência e a eficiência de infraestruturas aeroportuárias e rodoviárias de elevada importância.

1.2 Objetivos

O objetivo central desta dissertação é avaliar, de forma integrada e rigorosa, o desempenho estrutural de pavimentos flexíveis, recorrendo a metodologias normativas, ensaios não destrutivos, modelos mecanicistas e tecnologias de monitorização avançadas. A investigação assenta em dois casos de estudo distintos, sendo o primeiro dedicado a uma pista de um aeroporto internacional, de elevada relevância estratégica, e o segundo a um troço rodoviário, no qual se exploram soluções inovadoras de inspeção através da monitorização remota.

No caso aeroportuário, o estudo analisou a evolução estrutural de uma pista comparando o seu comportamento estrutural entre os anos de 2000 e 2024. Para tal, recorreu-se ao software *FAA Rigid and Flexible Iterative Elastic Layered Design* (FAARFIELD) para determinar valores de PCR e ACR, avaliando a resistência do pavimento a diferentes aeronaves em diversos cenários, antes e após intervenções de reforço. Em complemento, foi utilizada a modelação numérica com o programa *Bitumen Stress Analysis in Roads* (BISAR), assente na teoria elástica linear em camadas, para a aplicação de dois critérios de ruína fundamentais no dimensionamento e avaliação de pavimentos: o critério de fadiga das camadas betuminosas e o critério de deformação permanente no solo de fundação. A articulação destas metodologias permitiu reforçar a interpretação dos resultados e aumentar a robustez das conclusões relativas à capacidade estrutural da infraestrutura aeroportuária.

No caso do estudo dos avanços na monitorização remota, os objetivos centraram-se na aplicação de tecnologias emergentes, nomeadamente interferometria por radar de abertura sintética (InSAR), *Light Detection and Ranging* (LiDAR) e veículos aéreos não tripulados (UAV), enquanto ferramentas de monitorização de pavimentos. Foi realizada a comparação e integração dos resultados obtidos com cada técnica, de forma a avaliar a sua consistência, explorar complementaridades e reduzir as incertezas associadas a cada abordagem. Este processo teve como finalidade avaliar as limitações e potencialidades destas técnicas para o desenvolvimento de uma base de análise mais rigorosa e fiável, capaz de apoiar uma caracterização mais precisa do desempenho estrutural dos pavimentos rodoviários.

Assim, a dissertação estabeleceu como objetivo final a combinação de metodologias tradicionais e inovadoras em dois contextos distintos, de modo a desenvolver uma abordagem comparativa que aumente a precisão das avaliações estruturais e sustente estratégias fundamentadas de gestão e manutenção de infraestruturas críticas de transporte.

1.3 Organização do documento

Esta dissertação encontra-se estruturada em seis capítulos. O **Capítulo 1** apresenta a introdução, definindo o enquadramento, os objetivos e a organização do documento. O **Capítulo 2** aborda a avaliação estrutural de pavimentos aeroportuários. Inicialmente, descrevem-se as características e tipologia dos pavimentos. Posteriormente, apresentam-se as metodologias de avaliação, critérios de dimensionamento e metodologias de classificação estrutural aeroportuária, incluindo as metodologias *Aircraft Classification Number/Pavement Classification Number* (ACN/PCN) e ACR/PCR e o software FAARFIELD, utilizado no dimensionamento e análise estrutural de pavimentos. O **Capítulo 3** explora o primeiro caso de estudo, aplicado a uma pista aeroportuária.

O **Capítulo 4** aborda várias tecnologias emergentes de monitorização remota, a InSAR, LiDAR e levantamento com drones (UAV), incluindo os seus componentes, funcionamento, vantagens e limitações e aplicações em infraestruturas de transporte. O **Capítulo 5** apresenta o segundo caso de estudo, centrado na utilização de métodos remotos à análise de um troço rodoviário, complementando e alargando a perspetiva do estudo. Finalmente, o **Capítulo 6** reúne as conclusões finais, sintetizando os principais resultados obtidos ao longo do trabalho.

AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS

2.1 Conceitos básicos associados aos principais componentes

Os pavimentos aeroportuários constituem elementos estruturais essenciais das infraestruturas aeronáuticas, desenvolvidos para resistir a solicitações exigentes resultantes do tráfego de aeronaves. Para além da elevada magnitude das cargas aplicadas, devem garantir condições de segurança, conforto e durabilidade, enfrentando simultaneamente ações climáticas, químicas e mecânicas ao longo do seu ciclo de vida (FAA, 2021). As suas principais funções incluem a distribuição eficiente dos esforços induzidos pelas aeronaves, a manutenção de uma superfície regular e aderente, a promoção de uma drenagem eficaz e a resistência à ação de substâncias agressivas, como combustíveis, óleos ou agentes de controlo de gelo. A integridade da superfície é crucial para assegurar operações seguras, sobretudo nas fases mais críticas do voo, como a descolagem e a aterragem (FAA, 2021).

O desempenho global destes pavimentos resulta da interação de quatro componentes fundamentais: o subleito natural, as camadas estruturais (superfície, base e sub-base), as características das cargas aplicadas (peso, pressão dos pneus, frequência e localização) e as condições climáticas do local. Para satisfazer os requisitos funcionais exigidos como estabilidade, resistência ao desgaste, regularidade e operacionalidade em todas as condições meteorológicas é indispensável garantir uma capacidade estrutural adequada, um correto processo construtivo com materiais de qualidade e uma manutenção contínua e eficaz (FAA, 2021).

O projeto deve ainda considerar as especificidades operacionais de cada zona do aeroporto, nomeadamente as pistas, que estão sujeitas às maiores solicitações estruturais,

variando estas em função do tipo de manobra e da localização ao longo da extensão da infraestrutura. Assim, as soluções construtivas devem ser adaptadas às exigências previstas, sendo os pavimentos geralmente classificados como flexíveis, rígidos ou semi-rígidos, conforme as características de utilização, os níveis de solicitação esperados e as estratégias de manutenção adotadas.

2.2 Composição e estrutura de um pavimento aeroportuário

2.2.1 Pavimentos Flexíveis

Os pavimentos flexíveis (Figura 2.1) são estruturas compostas por diversas camadas, cuja função principal é assegurar a dissipação progressiva dos esforços gerados pelas cargas das aeronaves, desde a superfície até ao solo de fundação. Esta dissipação é garantida pela utilização de materiais com módulos de deformabilidade decrescentes em profundidade, permitindo uma distribuição contínua das cargas ao longo da espessura do pavimento (Fontul, 2023).

A estrutura típica de um pavimento flexível inclui, de cima para baixo: uma camada de desgaste, geralmente constituída por uma mistura betuminosa de granulometria controlada e ligante asfáltico (FAA, 2021); uma camada de regularização, aplicada sempre que necessário para garantir a uniformidade geométrica da base; uma camada de base, frequentemente estabilizada com ligantes betuminosos; uma camada de sub-base granular; e o solo de fundação (Fontul, 2023). A camada superficial tem como função resistir à ação direta do tráfego, assegurar a aderência das aeronaves, evitar a infiltração de água e manter a regularidade da superfície. Esta é a camada mais exposta às ações ambientais e mecânicas, sendo, por isso, também a mais sujeita ao desgaste e à deterioração precoce (FAA, 2021).

A camada de base desempenha um papel estrutural fundamental, transmitindo as cargas verticais provenientes da superfície para as camadas inferiores. Apresenta um módulo de elasticidade mais elevado do que a sub-base, sendo frequentemente constituída por misturas betuminosas ou agregados selecionados. A sub-base, por sua vez, tem como principal função complementar a distribuição de tensões, sendo formada por materiais granulares compactados, com menor rigidez, mas elevada capacidade de suporte. Por fim, o solo de fundação, apesar de estar sujeito a esforços menos intensos, deve possuir características geotécnicas adequadas, nomeadamente em termos de compactação, saturação e resistência à

deformação permanente, de forma a garantir a estabilidade global da estrutura (FAA, 2021; Fontul, 2023).

Entre os mecanismos de degradação mais comuns neste tipo de pavimentos destacam-se o fendilhamento por fadiga, resultante da extensão à tração na base das camadas betuminosas, e as deformações permanentes, como a formação de *rodeiras*, induzidas pela acumulação das deformações nas camadas granulares e no solo de fundação (FAA, 2021; Fontul, 2023).

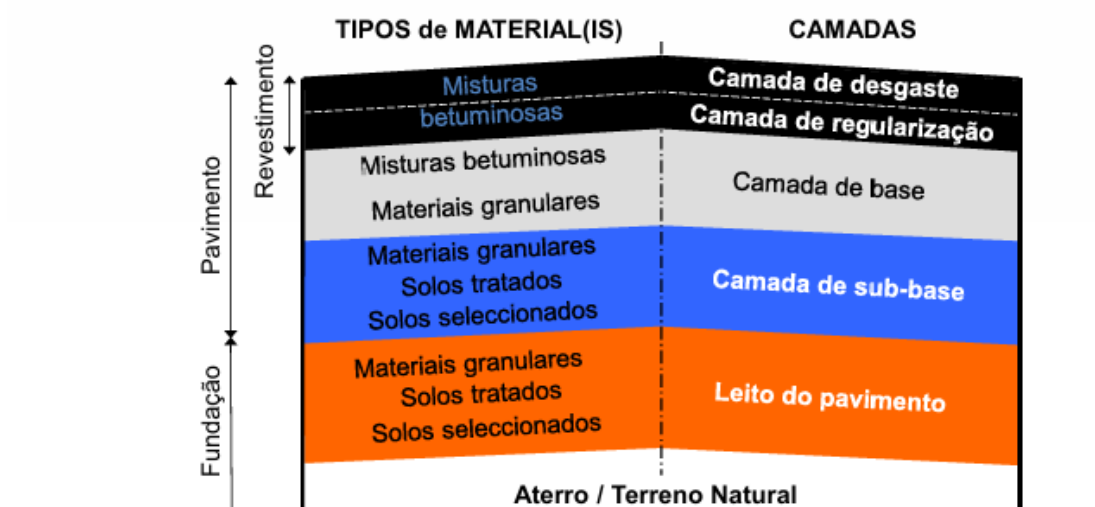


Figura 2.1 - Estrutura de um pavimento flexível. Fonte: Fontul (2023).

2.2.2 Pavimentos Rígidos

Os pavimentos rígidos (Figura 2.2) são sistemas estruturais caracterizados pela presença de uma camada de desgaste em betão de cimento Portland, a qual assume a função principal de resistência às cargas aplicadas (FAA, 2021). Ao contrário dos pavimentos flexíveis, onde o suporte é repartido por várias camadas, nos pavimentos rígidos é a própria laje de betão que absorve e distribui os esforços, devido ao seu elevado módulo de elasticidade e comportamento em flexão.

A estrutura de um pavimento rígido é composta, geralmente, por uma laje de betão aplicada diretamente sobre uma base granular ou tratada, apoiada por uma sub-base e pelo solo de fundação (Fontul, 2023). Esta configuração permite uma transmissão das cargas verticais sobre uma área significativamente maior, reduzindo a solicitação das camadas inferiores. As zonas de estacionamento de aeronaves, áreas sujeitas a cargas estáticas elevadas

e a longos períodos de permanência, são frequentemente projetadas com este tipo de pavimento, dada a sua elevada capacidade de suporte e durabilidade (FAA, 2021).

Os pavimentos rígidos estão sujeitos a mecanismos de degradação específicos, entre os quais se destaca o fendilhamento por fadiga das lajes de betão, provocado pela repetida aplicação de cargas de tração. As fendas podem iniciar-se na face inferior ou superior da laje, dependendo da posição da carga e da eficácia na transferência de esforços entre juntas. Outros fatores, como a compactação deficiente do subleito, a presença de finos móveis (resultantes, por exemplo, de fenómenos de bombagem) ou as variações térmicas associadas a ciclos de arrefecimento, comprometem a integridade estrutural da laje e aceleram o processo de deterioração (Fontul, 2023). A má execução das juntas ou a inexistência de sistemas de drenagem adequados pode agravar significativamente a degradação da estrutura, exigindo intervenções corretivas mais complexas e onerosas (FAA, 2021).

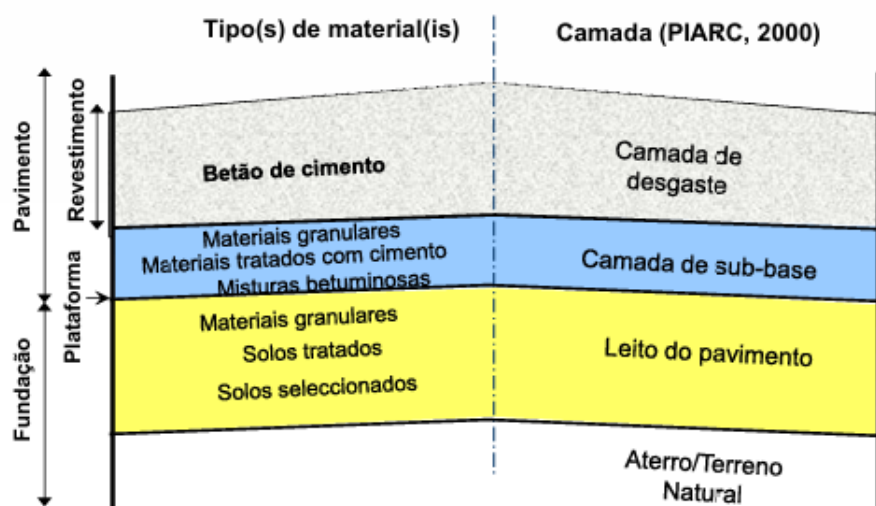


Figura 2.2 - Estrutura de um pavimento rígido. Fonte: Fontul (2023).

2.2.3 Pavimentos Semi-Rígidos

Os pavimentos semi-rígidos (Figura 2.3) constituem uma solução intermédia entre os pavimentos flexíveis e rígidos, integrando características de ambos os sistemas. A sua estrutura combina uma camada de desgaste em mistura betuminosa com uma base tratada com ligantes hidráulicos, como o cimento Portland, formando uma camada com

comportamento estrutural próximo do betão magro ou de materiais estabilizados, como os agregados de granulometria extensa com cimento (Fontul, 2023).

Esta camada de base confere à estrutura uma rigidez superior à de um pavimento flexível convencional, proporcionando uma distribuição mais eficiente das tensões verticais. A estrutura inclui ainda uma sub-base granular e o solo de fundação, podendo recorrer-se a uma camada de regularização sobre a sub-base para garantir a uniformidade geométrica antes da aplicação da base cimentada. O seu desempenho depende, em grande parte, da qualidade dos materiais utilizados e do rigor na execução, sendo especialmente eficazes em zonas de tráfego intenso e cargas repetitivas (Fontul, 2023).

Apesar das suas vantagens estruturais, os pavimentos semi-rígidos são particularmente suscetíveis ao fenómeno de reflexão de fendas. Esta patologia resulta da propagação de fissuras ou juntas existentes na camada estabilizada para a camada superior betuminosa, sendo frequentemente induzida por retrações térmicas ou degradações internas das camadas cimentadas. A presença destas fendas afeta a regularidade da superfície e pode comprometer a funcionalidade da infraestrutura, exigindo intervenções de selagem ou reforço. A adoção de soluções como camadas de separação ou o uso de ligantes modificados pode mitigar este fenómeno, contribuindo para a durabilidade do pavimento (Fontul, 2023).

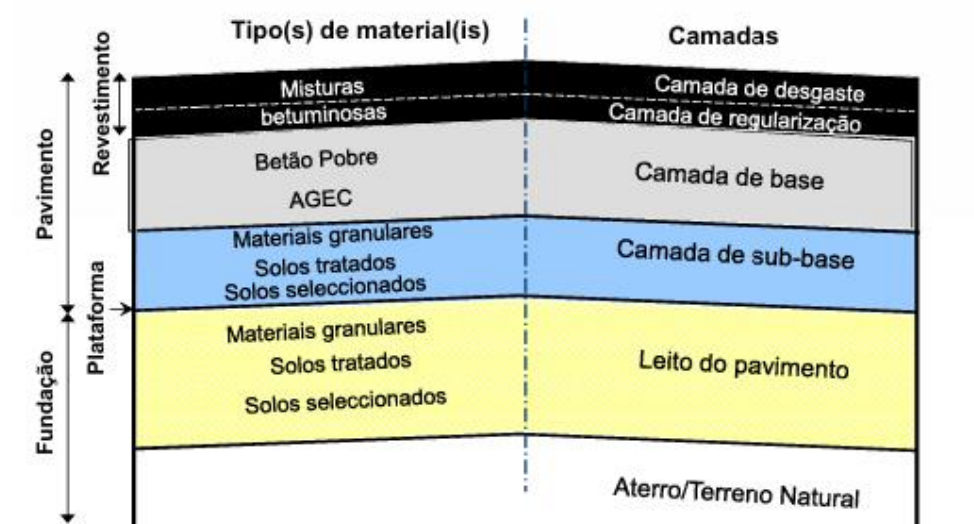


Figura 2.3 - Estrutura de um pavimento semi-rígido. Fonte: Fontul (2023).

2.3 Metodologia de avaliação

2.3.1 Enquadramento

A avaliação precisa da capacidade de suporte dos pavimentos aeroportuários requer a utilização de diferentes ensaios de campo e ferramentas de modelação numérica. Estas metodologias complementam-se para garantir a representatividade das condições reais do pavimento.

2.3.2 Ensaio de carga com defletómetro de impacto

O Deflectómetro de Impacto (*Falling Weight Deflectometer* — FWD) (Figura 2.4) é um equipamento de ensaio não destrutivo amplamente utilizado para avaliar as características estruturais dos pavimentos aeroportuários, especialmente pistas de voo, táxis e plataformas. Este dispositivo aplica uma carga dinâmica sobre a superfície do pavimento, simulando o efeito da passagem de uma aeronave, e mede as deflexões geradas (FAA, 2011).



Figura 2.4 - Deflectómetro de Impacto

A carga é gerada através da queda de uma massa sobre molas de borracha, sendo transmitida ao pavimento por intermédio de uma placa rígida, geralmente com 30 cm ou 45 cm de diâmetro (FAA, 2011; ver Figura 2.5). Sensores de deflexão, dispostos radialmente a partir do centro da placa, registam a resposta da estrutura, permitindo a obtenção da bacia de deflexão, cuja forma e amplitude refletem o comportamento global e por camadas do pavimento (FAA, 2011; ver Figura 2.6)

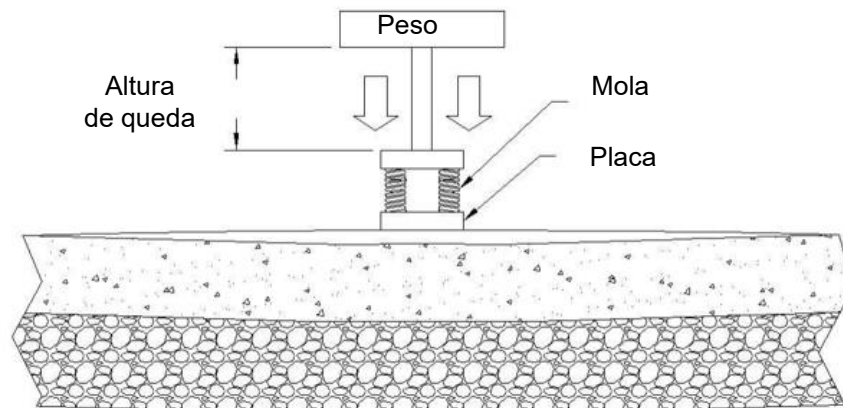


Figura 2.5 - Defletoímetro de impacto: elementos. Fonte: adaptado de FAA (2011).

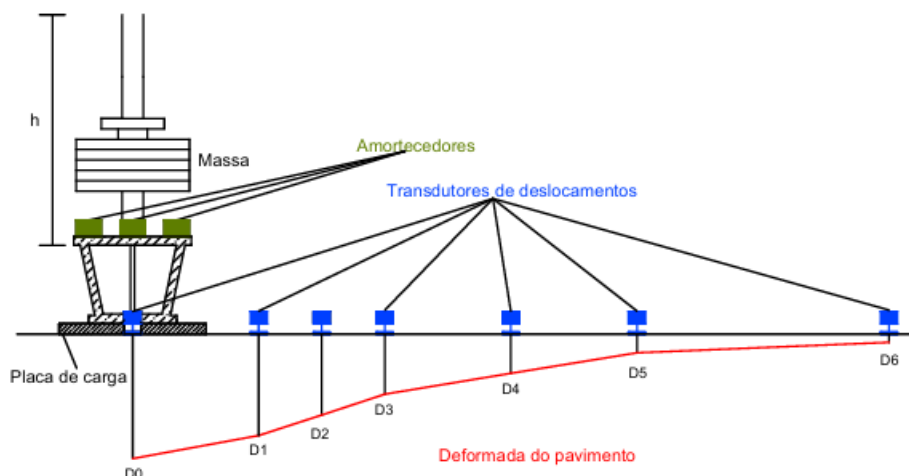


Figura 2.6 - Defletoímetro de Impacto: sensores e exemplo de deformação observada. Fonte: Fontul (2023).

Em ambiente aeroportuário, a utilização do FWD é fundamental para identificar zonas com degradação estrutural, avaliar a capacidade de carga, apoiar campanhas de retroanálise e contribuir para o dimensionamento estrutural e para a avaliação no âmbito do método ACR/PCR (FAA, 2022; Fontul, 2023). A *Federal Aviation Administration* (FAA) reconhece a necessidade de padronizar procedimentos de ensaio e análise, dado que fatores como o modelo do equipamento, o método específico de ensaio e os algoritmos de retroanálise podem influenciar os resultados (FAA, 2011).

Entre as principais vantagens do FWD em contextos aeroportuários destacam-se a rapidez de execução, a elevada mobilidade do equipamento, a possibilidade de ensaiar zonas

operacionais críticas com impacto mínimo nas operações, e o facto de não implicar a remoção de materiais do pavimento (FAA, 2011; Fontul, 2023).

2.3.3 Medição da espessura das camadas com georadar

O Georadar (*Ground Penetrating Radar — GPR*) (Figura 2.7) é uma tecnologia não destrutiva baseada na emissão e receção de ondas eletromagnéticas (Figura 2.8), aplicada na investigação das condições subsuperficiais dos pavimentos, sendo amplamente utilizado em aeroportos (FAA, 2011).



Figura 2.7 - Georadar no terreno (Caso de Estudo 2)

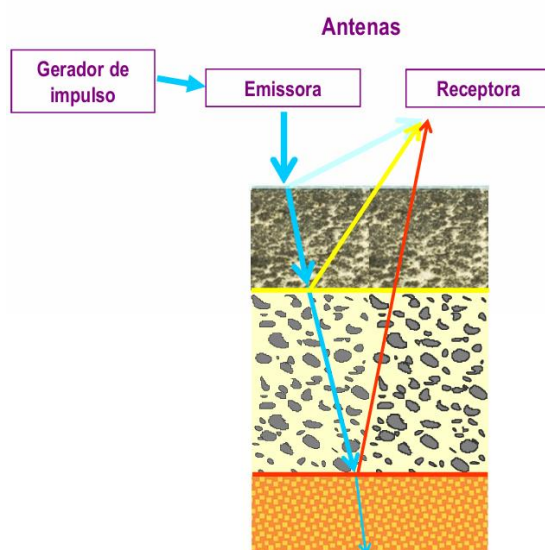


Figura 2.8 - Funcionamento do georadar. Fonte: Fontul (2023).

Este sistema permite, de forma rápida e contínua, obter dados sobre a espessura das camadas do pavimento e a identificação de discontinuidades ou heterogeneidades

construtivas (FAA, 2011; Fontul, 2023). A estrutura do sistema inclui uma antena (acoplada ao solo ou suspensa), uma unidade de controlo, um medidor de distância (DMI) e um computador para aquisição e visualização de dados (Figura 2.9).



Figura 2.9 - Computador ligado e a receber informação do georadar (Caso de Estudo 2).

Nos aeroportos, o GPR é particularmente relevante para inspeções de grandes áreas como pistas de descolagem e aterragem, caminhos de circulação e plataformas de estacionamento, permitindo detetar variações de espessura e descontinuidades construtivas que possam comprometer a segurança operacional (Fontul, 2023). O princípio de funcionamento do GPR assenta no contraste de constantes dielétricas entre os materiais, o que possibilita a identificação de interfaces entre camadas ou de elementos embebidos como armaduras ou condutas (Figura 2.10) (FAA, 2011).

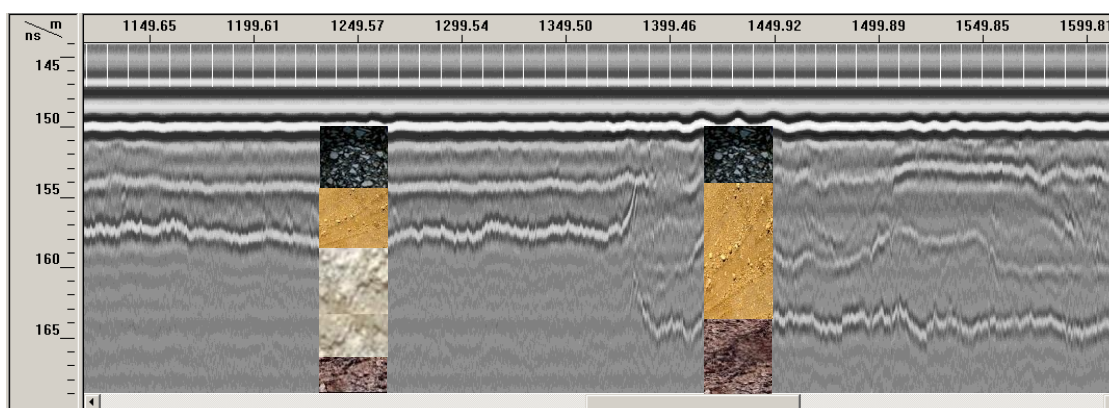


Figura 2.10 - Exemplo de elementos detetados pelo georadar. Fonte: Fontul (2023)

A integração dos dados obtidos pelo GPR com os resultados dos ensaios FWD constitui uma prática recomendada em aeroportos, permitindo uma caracterização estrutural mais

completa, a definição de zonas homogêneas e a calibração dos modelos de retroanálise necessários ao dimensionamento técnico e à gestão da infraestrutura aeroportuária (Fontul, 2023).

2.3.4 Divisão em zonas de comportamento estrutural homogêneo

A definição de zonas de comportamento estrutural homogêneo constitui uma etapa fundamental no âmbito da avaliação estrutural de pavimentos aeroportuários. Esta fase permite segmentar o pavimento em áreas cuja resposta estrutural se considere semelhante, possibilitando uma análise mais precisa da sua capacidade de suporte e a consequente definição de intervenções de manutenção ou reabilitação adaptadas a cada zona (Fontul, 2023).

A metodologia de zonamento baseia-se, tipicamente, na interpretação dos resultados obtidos através de ensaios de carga não destrutivos, nomeadamente com recurso a FWD. A identificação das zonas homogêneas pode ser realizada por observação direta dos gráficos de variação das deflexões ou através de métodos estatísticos, como o método das diferenças acumuladas, recomendado pela *American Association of State Highway and Transportation Official* (AASHTO). Este método consiste no cálculo da média das deflexões máximas medidas, na determinação dos desvios de cada ponto relativamente a essa média, no somatório acumulado desses desvios e na representação gráfica dos resultados. As mudanças de tendência no gráfico indicam, de forma objetiva, as transições entre zonas estruturalmente distintas (Fontul, 2023).

Para uma caracterização mais representativa de cada zona, é habitual a seleção de um ponto característico, cuja deformada medida se aproxime do valor correspondente ao percentil 85 das deflexões registadas. Este procedimento assegura que o ponto selecionado representa de forma conservadora o comportamento estrutural da zona em análise, sendo as deflexões por ele medidas excedidas em apenas 15% dos casos. O cálculo do percentil 85 segue a equação 2.1:

$$D_{85} = D \text{ médio} + 1,04 \times (DP) \quad (\text{equação 2.1})$$

em que D_{85} representa a deflexão ao percentil 85, D médio é a média das deflexões e DP o desvio padrão (Fontul, 2023).

A definição de zonas de comportamento homogêneo deve ainda considerar outros fatores críticos, como as características construtivas, o histórico de intervenções, os resultados da inspeção visual, a distribuição do tráfego e as condições dos solos de fundação, uma vez

que estas variáveis influenciam significativamente o desempenho estrutural do pavimento (Fontul, 2023).

Este processo metodológico de zonamento revela-se essencial para uma análise estruturada e eficaz da capacidade de suporte dos pavimentos aeroportuários, permitindo a otimização dos recursos associados às atividades de manutenção e reabilitação, de forma a garantir níveis adequados de segurança, conforto e durabilidade.

2.4 Critérios de dimensionamento e ruína

2.4.1 Enquadramento

O dimensionamento dos pavimentos aeroportuários implica o cumprimento de critérios técnicos que asseguram a sua capacidade estrutural, prevenindo o desenvolvimento de mecanismos de ruína ao longo do tempo. Estes critérios são diferenciados consoante o tipo de pavimentos: flexíveis, rígidos ou semirrígidos (LNEC, 2001; LNEC, 2007; Fontul, 2023).

Os dois critérios de dimensionamento usados na avaliação estrutural de pavimentos são a resistência à fadiga e à deformação permanente. No caso do critério de fadiga pretende-se prevenir o fendilhamento de baixo para cima nas camadas ligadas, através da limitação da extensão à tração na base das camadas betuminosas, no caso dos pavimentos flexíveis, e limitação da tensão à tração na base da camada de betão de cimento, no caso dos pavimentos rígidos. No caso do critério de deformação permanente, pretende-se prevenir o desenvolvimento de cavados de rodeira através da limitação da extensão à compressão no topo do solo de fundação, em todos os tipos de pavimento (LNEC, 2001; Fontul, 2023). De seguida são apresentados os critérios de dimensionamento de pavimentos.

2.4.2 Fendilhamento por fadiga em camadas betuminosas

A fadiga das camadas betuminosas resulta da repetição cíclica das solicitações de tração induzidas pelas cargas dos aviões, conduzindo à formação progressiva de fendas. A determinação de ocorrência deste fenómeno é efetuada através do critério preconizado pela Shell (1978), definido pela equação 2.2 (LNEC, 2001; LNEC, 2007):

$$\varepsilon_t = (0,856 \times V_b + 1,08) \times E^{-0,36} \times N^{-0,20} \quad (\text{equação 2.2})$$

em que:

- ϵ : corresponde à extensão máxima de tração admissível na base das camadas betuminosas.
- V_b : é a percentagem volumétrica de betume, habitualmente situada entre 9% e 12%.
- E : representa o módulo de elasticidade (deformabilidade) da mistura betuminosa, expresso em Pascal.
- N : corresponde ao número admissível de aplicações de carga.

Este critério permite assegurar que as extensões à tração não excedem os limites que comprometam a integridade estrutural das camadas betuminosas, prevenindo o fendilhamento de baixo para cima na camada (LNEC, 2001; LNEC, 2007).

2.4.3 Fendilhamento por fadiga em camadas de betão

Nos pavimentos rígidos, o dimensionamento tem como principal objetivo o controlo das tensões de tração induzidas nas lajes de betão, garantindo que estas se mantêm dentro de limites que assegurem a durabilidade da infraestrutura (LNEC, 2007).

Para cargas aplicadas no centro das lajes, a tensão máxima de tração admissível não deve exceder 64% da resistência à tração em flexão do betão, conforme expresso na equação 2.3 (LNEC, 2007):

$$\sigma_{\text{máx, centro}} = 0,64 \times \sigma_f \quad (\text{equação 2.3})$$

em que " $\sigma_{\text{máx, centro}}$ " representa a tensão máxima admissível no centro da laje e σ_f corresponde à resistência característica à tração em flexão do betão. Este critério permite garantir um número de aplicações de carga superior a 10.000, evitando o aparecimento de fendilhamento ou rotura por fadiga nas lajes (LNEC, 2007).

No caso de cargas aplicadas nas proximidades dos bordos das lajes, admite-se um critério menos conservador, permitindo uma tensão máxima equivalente a 67% da resistência à tração em flexão do betão, expressa na equação 2.4 (LNEC, 2007).

$$\sigma_{\text{máx, bordo}} = 0,67 \times \sigma_f \quad (\text{equação 2.4})$$

A consideração deste critério assegura a durabilidade das zonas de extremidade das lajes, onde as solicitações são normalmente mais elevadas devido à transferência de cargas entre elementos estruturais (LNEC, 2007).

2.4.4 Deformação permanente no solo de fundação

O dimensionamento de pavimentos deve ainda garantir que o solo de fundação não desenvolve deformações permanentes excessivas. Para tal, é aplicado o critério de deformação admissível definido por Chou (1982), expresso na equação 2.5 da seguinte forma (LNEC, 2001; LNEC, 2007):

$$\varepsilon_c = 0,00539 \times N^{-0,1436} \quad (\text{equação 2.5})$$

em que ε_c representa a extensão vertical de compressão admissível no topo da camada de solo de fundação e N o número admissível de aplicações de carga.

A utilização deste critério assegura que a fundação mantém a sua capacidade estrutural ao longo do tempo, evitando o aparecimento de cavados de rodeira que comprometeria o desempenho global do pavimento (LNEC, 2001; LNEC, 2007).

A aplicação destes critérios de dimensionamento garante que os pavimentos aeroportuários mantenham o seu desempenho estrutural ao longo do ciclo de vida previsto, assegurando as condições de segurança, funcionalidade e conforto exigidas em operações aeroportuárias.

2.5 Nova metodologia de Classificação Estrutural Aeroportuária

2.5.1 Metodologia anterior (ACN/PCN)

A metodologia ACN/PCN foi instituída pela *International Civil Aviation Organization* (ICAO, 2022) com o objetivo de uniformizar a forma de expressar a relação entre a solicitação exercida pelas aeronaves e a capacidade de suporte dos pavimentos aeroportuários (Brill, 2023b). Este sistema está em vigor desde 1980 e continua a ser amplamente utilizado em diversos países para a gestão operacional da infraestrutura aeroportuária (Fontul, 2023).

O ACN representa o efeito de uma aeronave padrão sobre um pavimento padrão, e é calculado com base nos seguintes parâmetros: (1) Tipo de pavimento (flexível ou rígido); (2) Configuração do trem de aterragem; (3) Carga por roda; (4) Pressão de enchimento dos pneus; e (5) Características do subleito, expressas em termos do *California Bearing Ratio* (CBR), para pavimentos flexíveis, ou do módulo de reação k (MN/m³), para pavimentos rígidos (Fontul, 2023).

Por sua vez, o PCN define a capacidade de carga do pavimento em condições padrão: uma pressão de enchimento de pneus de 1,25 MPa e 10.000 recobrimentos. A aeronave pode operar sem restrições se o seu ACN for igual ou inferior ao PCN do pavimento.

A classificação PCN é apresentada no formato (ver Fontul, 2023):

PCN / TIPO / RESISTÊNCIA / PRESSÃO / MÉTODO

onde:

- PCN: Valor numérico = $2F$ (kN)/g (aceleração gravitacional)
- TIPO: F (flexível) ou R (rígido);
- RESISTÊNCIA:
 - A: $\text{CBR} > 13\%$ ou $k > 120 \text{ MN/m}^3$
 - B: $8\% < \text{CBR} \leq 13\%$ ou $60 < k \leq 120 \text{ MN/m}^3$
 - C: $4\% < \text{CBR} \leq 8\%$ ou $25 < k \leq 60 \text{ MN/m}^3$
 - D: $\text{CBR} < 4\%$ ou $k < 25 \text{ MN/m}^3$
- PRESSÃO:
 - W: sem limite
 - X: $\leq 1,5 \text{ MPa}$
 - Y: $\leq 1,0 \text{ MPa}$
 - Z: $\leq 0,5 \text{ MPa}$
- MÉTODO:
 - T: análise técnica
 - U: avaliação empírica .

A determinação analítica do PCN pode ser feita por retroanálise com base em ensaios não destrutivos, como os realizados com deflectómetros de impacto, complementados com

sondagens e georadar. A utilização de modelos de comportamento mecanicistas permite definir zonas homogêneas e aferir a capacidade de carga por zona (Fontul, 2023).

2.5.2 Metodologia recente (ACR/PCR)

A evolução do sistema ACN/PCN levou à introdução do método ACR/PCR, aprovado pela ICAO em 2020, na Emenda 15 ao Anexo 14. Esta abordagem baseia-se em modelos elásticos em camadas e utiliza os mesmos fundamentos de cálculo tanto para as aeronaves (ACR) como para os pavimentos (PCR), o que garante coerência técnica (FAA, 2022; ICAO, 2022).

O valor do ACR é determinado pelos seguintes fatores: (1) Peso da aeronave; (2) Geometria do trem de aterragem; (3) Pressão padronizada de pneus (1,5 MPa); (4) Tipo de pavimento (F ou R); (5) Módulo de elasticidade do subleito (E); e (6) Posicionamento do centro de gravidade (FAA, 2022). A classificação do subleito é feita conforme a Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Classificação do subleito, baseada no valor do módulo de elasticidade (E).

Classe	Designação	E (MPa)
A	Elevada	≥ 150
B	Média	100–149
C	Baixa	60–99
D	Muito baixa	< 60

No sistema ACR/PCR, a categoria da pressão de enchimento dos pneus é padronizada de acordo com o seguinte código (FAA, 2022):

- W: sem limite;
- X: até 1,75 Mpa;
- Y: até 1,25 Mpa;
- Z: até 0,5 Mpa.

O ACR corresponde a duas vezes o valor do Derived Single Wheel Load (DSWL), em centenas de kg, com pressão de enchimento de 1,5 MPa (FAA, 2022).

A determinação do PCR pode seguir duas abordagens: (1) Avaliação empírica, com base na aeronave mais exigente; e (2) Avaliação técnica, utilizando o software FAARFIELD (FAA,

2021). Esta última tipologia de avaliação considera a seguinte informação: (a) Configuração estrutural do pavimento; (b) Módulos de elasticidade por camada; (c) Composição e frequência de tráfego; e (d) Critérios de ruína (fadiga, rutura, deformação plástica) (FAA, 2022).

O elemento-chave da metodologia ACR/PCR é o *Cumulative Damage Factor* (CDF). Este representa a fração da vida útil estrutural consumida, sendo definido como a razão entre o número de carregamentos aplicados e o número de carregamentos admissíveis até à falha do pavimento. Um CDF de 1,0 indica o fim da vida útil teórica da secção de pavimento. A ICAO define, como referência para o cálculo do ACR, uma vida útil de 36500 recobrimentos (ICAO, 2022), considerando uma pressão de enchimento de 1,5 MPa, que corresponde a uma operação diária durante 100 anos — um valor técnico de base, não um limite operacional fixo.

Este modelo permite, assim, avaliar a contribuição de cada aeronave para o desgaste total do pavimento, identificar o ponto crítico mais solicitado, e antecipar intervenções de manutenção com base em previsões realistas da degradação estrutural (ICAO, 2022).

A estrutura da classificação PCR é similar à do PCN, mas com nomenclatura adaptada (FAA, 2022):

PCR / TIPO / SUBLEITO / PRESSÃO / MÉTODO

onde:

- PCR: Valor numérico = $10 \times 2F$ (kN)/g (aceleração gravitacional)
- TIPO: R (rígido) ou F (flexível);
- SUBLEITO: A, B, C ou D (módulo de elasticidade);
- PRESSÃO: W, X, Y ou Z (limite de pressão);
- MÉTODO: T (técnico) ou U (empírico).

2.5.3 Comparação ACN/PCN vs. ACR/PCR

O sistema ACN/PCN apresenta limitações relevantes, por utilizar condições simplificadas (ex.: 10.000 recobrimentos, pressão de 1,25 MPa) que não refletem as condições reais de operação nem a variabilidade do tráfego (Fontul, 2023).

O sistema ACR/PCR supera estas limitações ao: (1) Incorporar modelos de dimensionamento mecanicistas; (2) Considerar o dano cumulativo (CDF); (3) Ajustar a pressão

dos pneus e os módulos de elasticidade às condições reais; e (5) Permitir uma previsão mais rigorosa da vida útil do pavimento (FAA, 2022).

O CDF destaca-se como elemento central na avaliação estrutural técnica, pois permite relacionar o esforço acumulado de tráfego com a degradação progressiva do pavimento. A combinação das aeronaves em operação gera um perfil de desgaste preciso, facilitando uma gestão eficaz do ciclo de vida da infraestrutura (ICAO, 2022).

Apesar da sua complexidade técnica, o ACR/PCR oferece maior precisão e coerência com os princípios da engenharia de pavimentos e está alinhado com as diretrizes internacionais, permitindo inclusive contribuições significativas para a redução dos custos relacionados com a manutenção e operação aeroportuária (ICAO, 2022).

2.5.4 Programa de cálculo FAARFIELD

O dimensionamento e a avaliação de pavimentos aeroportuários constituem etapas fundamentais para a segurança, eficiência e durabilidade das infraestruturas de transporte aéreo. Neste contexto, a FAA desenvolveu o FAARFIELD, atualmente na versão 2.1.1, que se assume como o software de referência para o cálculo da espessura de pavimentos aeroportuários e para a determinação da sua capacidade estrutural (FAA, 2023). O programa acompanha os documentos normativos AC 150/5320-6G – *Airport Pavement Design and Evaluation* (FAA, 2021) e AC 150/5335-5D – *Standardized Method of Reporting Pavement Strength* (PCR) (FAA, 2022), garantindo alinhamento com as práticas recomendadas a nível internacional (FAA, 2023).

O FAARFIELD é um programa de utilização intuitiva que permite criar ou recriar estruturas de pavimentos aeroportuários, considerando diferentes tipos de pistas, materiais e camadas (Figura 2.11). Através de modelos numéricos avançados, incorpora respostas tridimensionais (3D FEM – *Finite Element Method*) para cargas aplicadas por aeronaves, no caso de pavimentos rígidos e de reforços rígidos, assegurando uma análise mais fiel das tensões e deformações. Esta metodologia, embora mais exigente em termos computacionais, traduz-se numa maior precisão no dimensionamento e na avaliação da vida útil das estruturas (Brill, 2023a).

Entre as principais funcionalidades do FAARFIELD destacam-se: (1) Análise de espessuras e cálculo da vida residual dos pavimentos; (2) Avaliação da resistência estrutural através dos índices ACR e PCR; (3) Cálculo do CDF, indicador essencial para estudos de fadiga (Figura 2.12); (4) Identificação automática da aeronave mais crítica no tráfego definido; e (5)

Possibilidade de criação, gestão e importação de *Traffic Mix* (conjunto de diversas aeronaves e movimentos), recorrendo a uma biblioteca de aeronaves permanentemente atualizada via PAVEAIR (FAA, 2023).

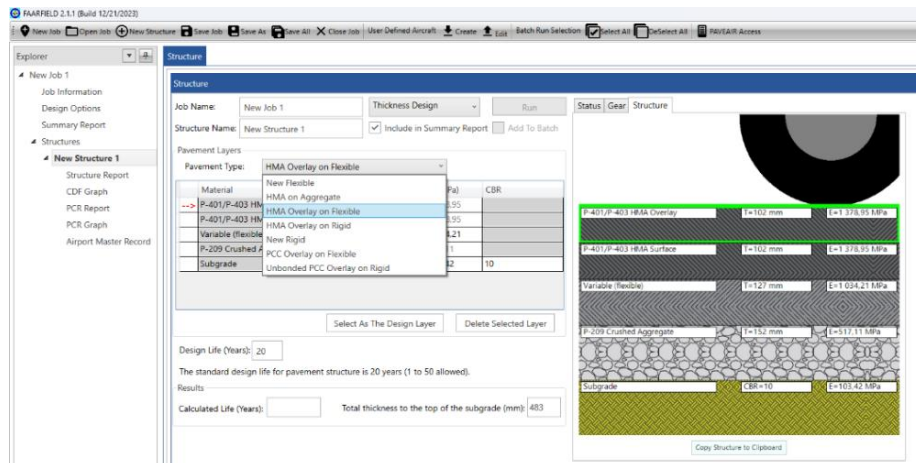


Figura 2.11 - Interface principal do software FAARFIELD.

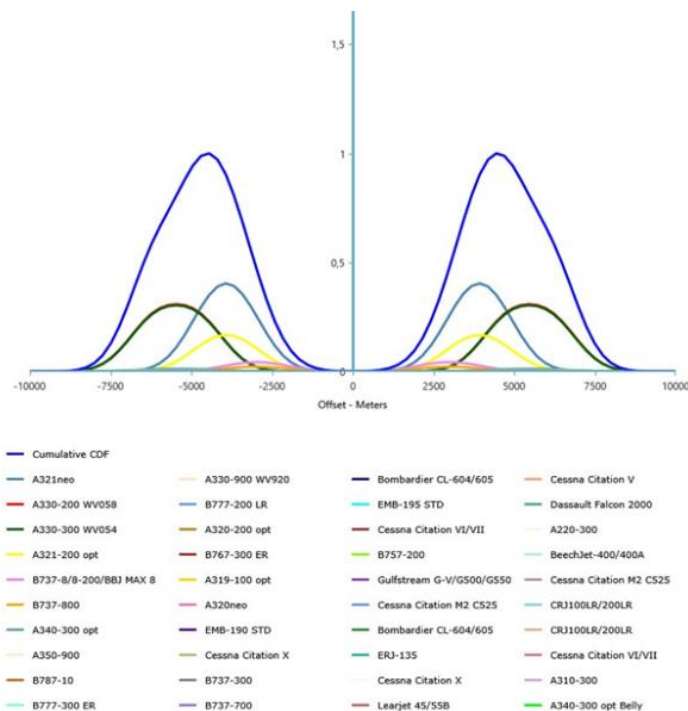


Figura 2.12 - Exemplo de gráfico do cálculo do fator de dano cumulativo no FAARFIELD.

A interface gráfica do programa foi melhorada nas versões mais recentes, apresentando resultados visuais de tensões em lajes (bordo e interior) e relatórios mais completos. Além disso, introduziu a opção de “Reduced Cross Section”, que permite estudos alternativos de dimensionamento tanto para pavimentos flexíveis como rígidos (Brill, 2023a).

Apesar das suas vantagens, o FAARFIELD apresenta algumas restrições técnicas, nomeadamente tempos de processamento elevados em análises complexas, restrição no número máximo de aeronaves por tráfego (40) e problemas pontuais em análises de PCR com determinadas configurações de trem de aterragem (Brill, 2023a). Estas restrições não diminuem, contudo, a sua relevância, já que o software continua a ser considerado a ferramenta oficial da FAA e uma referência mundial em engenharia aeroportuária.

Em termos de aplicabilidade, o FAARFIELD revela-se particularmente útil em contextos académicos, como ferramenta de estudo e experimentação, em projetos de engenharia, permitindo avaliar a adequação de pistas e dimensionar soluções de reforço de forma eficiente. A integração com normas internacionais, associada à constante atualização da biblioteca de aeronaves, reforça o seu papel como instrumento essencial para a gestão e modernização da infraestrutura aeroportuária.

Em síntese, o FAARFIELD é um programa poderoso e indispensável para o estudo, dimensionamento e avaliação de pavimentos aeroportuários, representando um equilíbrio entre rigor técnico e aplicabilidade prática que vai ser explorado no primeiro caso de estudo. (Brill, 2023a; FAA, 2023).

3 CLASSIFICAÇÃO ESTRUTURAL ACR/PCR.

CASO DE ESTUDO

3.1 Introdução do caso de estudo

Nas últimas décadas, os pavimentos aeroportuários têm vindo a destacar-se como um tema de investigação de elevada pertinência, acompanhando o crescimento exponencial do transporte aéreo e a consequente necessidade de garantir padrões cada vez mais exigentes de segurança, eficiência e sustentabilidade das operações. A produção científica nesta área registou uma evolução particularmente expressiva a partir da segunda metade da década de 2010, evidenciada não só pelo aumento do número de estudos publicados, mas também pelo impacto que estes têm gerado na comunidade académica e profissional, conforme ilustrado na Figura 3.1, elaborada a partir da base de dados *Web of Science* (Clarivate Analytics, <https://www.webofscience.com/wos/woscc/basic-search>, acedido em 19/09/2025). Esta tendência confirma que os pavimentos aeroportuários constituem, na atualidade, um domínio estratégico de investigação e desenvolvimento, fundamental para apoiar decisões de projeto, manutenção e reabilitação de infraestruturas críticas do transporte aéreo.

O presente caso de estudo incide sobre a principal pista de um aeroporto internacional com elevado volume de tráfego comercial e turístico, constituindo uma infraestrutura crítica para a conectividade aérea e o desenvolvimento económico da região onde se insere. Esta análise tem como objetivo comparar as condições estruturais e operacionais da pista num intervalo temporal de mais de duas décadas, confrontando dados obtidos no ano 2000 com informações e medições recentes (ano 2024).

A avaliação da evolução estrutural da pista foi efetuada com recurso a métodos não destrutivos e a simulações computacionais no software FAARFIELD, permitindo determinar e comparar valores de PCR e a sua relação com o tráfego efetivamente registado. Os resultados desta comparação podem fornecer suporte técnico para decisões de manutenção e reabilitação, considerando as exigências do tráfego aéreo atual e projetado.

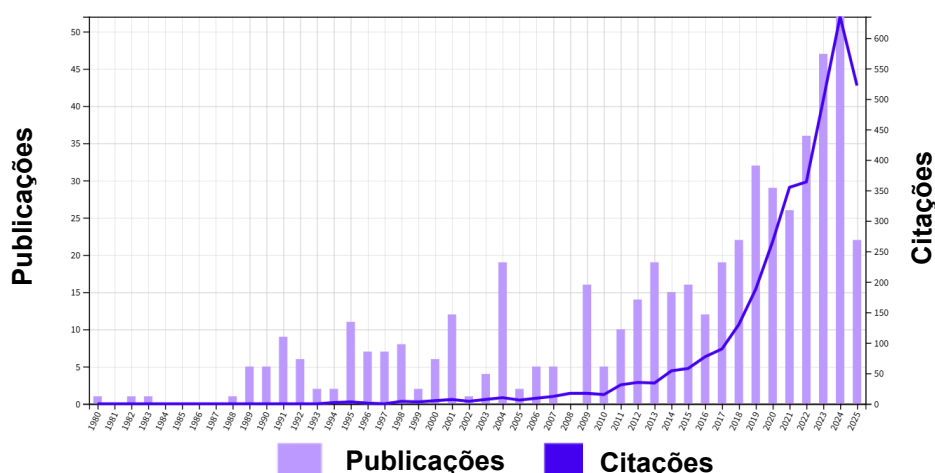


Figura 3.1 - Evolução do número de artigos científicos publicados e número de citações por ano, no período entre 1980 e 2025, com os termos “airport” e “pavement” no título.

3.2 Metodologia e Ferramentas de Avaliação

A avaliação estrutural e funcional da pista foi conduzida em dois momentos temporais distintos: um estudo inicial no ano 2000 (Relatório confidencial do LNEC) e uma atualização baseada em dados técnicos e operacionais recentes. Em ambos os casos, procurou-se caracterizar as condições estruturais do pavimento, estimando o PCN e o PCR em função do tráfego real.

3.2.1 Levantamento de 2000 – Estudo de Referência

O estudo original recorreu às seguintes técnicas e equipamentos não destrutivos amplamente aceites na engenharia aeroportuária:

- FWD – determinação de deflexões superficiais e cálculo indireto dos módulos de deformabilidade das camadas;
- GPR – medição contínua da espessura aproximada das camadas betuminosas e granulares;
- Sondagens à rotação – recolha de tarolos para verificação das espessuras obtidas pelo radar e avaliação da qualidade da colagem entre camadas.

3.2.2 Levantamento Recente

Para a avaliação das condições atuais e comparação com o estudo de 2000, foi obtida informação técnica detalhada sobre:

- Constituição atual das camadas da pista, incluindo espessuras e materiais em cada zona (dados obtidos de registos técnicos e inspeções).
- Histórico de intervenções realizadas (reforços em 1980, 1990, 2003 e 2017).
- Dados de tráfego aéreo registado ao longo de um ano recente (2024), contendo todos os movimentos por tipo e modelo de aeronave, obtido no âmbito da dissertação.

Estas informações foram integradas no modelo de cálculo estrutural para simulação no software FAARFIELD.

3.2.3 Critérios de Dimensionamento e Ruína

Para se efetuar uma adequada análise comparativa, o estudo referente ao período atual seguiu os mesmos princípios adotados no estudo original, avaliando/determinando os seguintes parâmetros:

- Critério de fadiga das camadas betuminosas;
- Critério de deformação permanente no solo de fundação;
- Determinação do PCN segundo as recomendações da ICAO, considerando o tráfego efetivo.

Para ambos os momentos, os modelos estruturais foram introduzidos no FAARFIELD, permitindo obter valores de PCR comparáveis e avaliar a evolução da capacidade de carga da pista ao longo do tempo.

3.3 Caracterização da Pista (Dados Históricos)

A pista analisada apresenta uma configuração geométrica com comprimento de 2 400 m e largura de 45 m, acrescida de bermas laterais de 7,5 m. A infraestrutura foi construída originalmente em 1965 e, ao longo das décadas, recebeu várias intervenções significativas de reforço e reabilitação, destacando-se as obras de 1980, 1990, 2003 e 2017.

No estudo de referência realizado em 2000, foi identificado que a pista se divide em duas zonas estruturais distintas, com base nos resultados dos ensaios de carga e tendo em conta a informação acima referida (Figura 3.2):

- **Zona 1:** do início da pista (pk0+000) até pk0+700;
- **Zona 2:** do pk0+700 até pk2+400.



Figura 3.2 - Representação simplificada da pista e das duas zonas estruturais

A pista em estudo sofreu diversas intervenções estruturais desde a sua construção inicial em 1965. De acordo com a informação recolhida, a sua evolução pode ser descrita da seguinte forma. Na constituição do pavimento foram utilizadas várias misturas betuminosas e materiais granulares, identificados pelas respetivas siglas. O AC14 Surf corresponde a uma *Asphalt Concrete* (mistura betuminosa densa a quente) com granulometria até 14 mm, aplicada em camadas de desgaste. O AC20 Binder designa igualmente uma *Asphalt Concrete*, com granulometria até 20 mm, utilizada como camada de ligação (*binder course*). O SMA11 Surf refere-se a uma mistura do tipo *Stone Mastic Asphalt*, com granulometria até 11 mm, aplicada como camada de desgaste em pavimentos sujeitos a tráfego intenso. Por sua vez, o ABGE corresponde a um Agregado Britado de Granulometria Extensa, aplicado como camada granular não ligada de base ou sub-base.

Em 1965, aquando da construção inicial, a estrutura do pavimento foi constituída por uma camada de desgaste em misturas betuminosas AC14 Surf, com 5,0 cm de espessura, uma camada de macadame betuminoso AC20 Binder, com 10 cm de espessura, uma camada de base em ABGE, com 30 cm de espessura, e uma sub-base em ABGE, com 45 cm de espessura.

No ano de 1980, foi realizada uma intervenção de reforço que consistiu na remoção e substituição da camada de desgaste na Zona 1. Nessa ocasião, na Zona 1 foi aplicada uma nova camada de AC14 Surf com 5,0 cm de espessura, enquanto na Zona 2 foi adicionada uma camada da mesma mistura betuminosa com 6,0 cm de espessura.

Posteriormente, em 1990, foi executado um novo reforço, traduzido pela aplicação de uma camada adicional de AC14 Surf. Esta apresentava 5,5 cm de espessura na Zona 1 e 4,5 cm de espessura na Zona 2, reforçando novamente a capacidade estrutural do pavimento.

Em 2003, foi efetuada uma intervenção mais abrangente, dado que a pista apresentava anomalias superficiais significativas, como fendilhamento na zona central da pista, degradação das juntas de construção e presença de “ninhos” e peladas registadas na

campanha de ensaios realizada em 2000. Assim, a intervenção em 2003 consistiu na remoção e substituição da camada de desgaste existente, sendo então colocada uma nova camada de AC14 Surf com 7,5 cm de espessura ao longo de toda a extensão da pista.

Finalmente, em 2017, procedeu-se à intervenção mais recente, correspondente à execução de uma nova camada de desgaste em SMA11, com 5,0 cm de espessura, que se encontra atualmente em serviço (Figura 3.3).

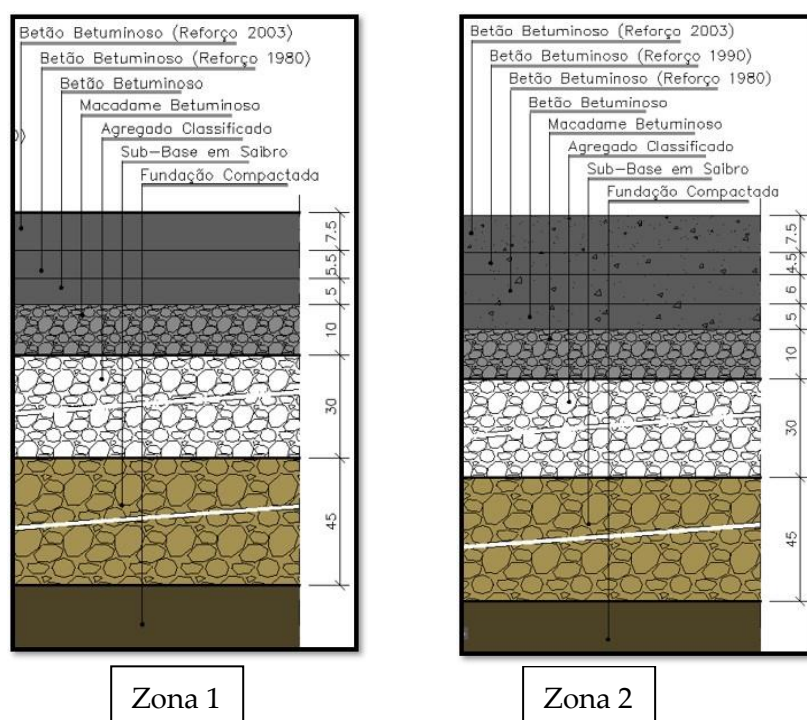


Figura 3.3 - Composição estrutural da pista nas zonas 1 e 2, sem a última camada de 2017. Fonte: Entidade aeroportuária.

3.4 Informações Disponíveis relativamente ao PCN da Pista

Com base nas campanhas de ensaio e nos estudos técnicos realizados, os valores de PCN previamente determinados para a pista em análise constituem uma referência fundamental. Estes elementos permitem estabelecer uma base de comparação com os resultados a obter no âmbito desta dissertação, possibilitando a avaliação da eficácia das intervenções efetuadas.

- Ano 2000 - Num estudo técnico realizado por entidade nacional de referência, a pista foi dividida e analisada em duas zonas distintas:

- Zona 1 (0–700 m): PCN = 82/F/A/W/T
- Zona 2 (700–2400 m): PCN = 68/F/B/W/T
- Intervenções de Reabilitação – Como mencionado, em 2003 e em 2017 foram executadas empreitadas de reforço estrutural, ambas com subida de cota. A intervenção de 2017 incluiu também fresagem da zona central (largura de 15 m) devido a fenómenos de degradação, com reposição através de misturas betuminosas (AC14/AC20) e aplicação de camada final em SMA11.
- Situação Recente - De acordo com informação disponível:
 - O valor publicado (2020) correspondia a PCN = 80/F/A/W/T.
 - O valor mais recente calculado indica PCN = 137/F/B/W/T (Fonte: entidade aeroportuária), refletindo a melhoria significativa da capacidade estrutural após as intervenções.

3.5 Dados de Tráfego

3.5.1 Pré-processamento da Informação de Tráfego para Integração no FAARFIELD

3.5.1.1 Enquadramento

Para a simulação no software FAARFIELD, foi necessário realizar um pré-processamento detalhado dos dados de tráfego fornecidos pela entidade aeroportuária, sob carácter confidencial. Estes dados incluíam uma listagem completa de todas as aterragens e descolagens ocorridas no aeroporto em estudo durante o ano de 2024. A informação foi disponibilizada em formato Excel, conforme ilustrado na Figura 3.4.

MType	Date	ST	ET	AT	Blocks	RWY	Aircraft	Capacit	WTC	MTOW	ST Date Time	Aircraft Capac
A	2024-10-23	08:40	07:48	07:50	07:55	10	A310	90	Heavy	157000	2024-10-23 08:40:00	90
D	2024-10-23	18:00		16:43	16:32	10	A310	90	Heavy	157000	2024-10-23 18:00:00	90
A	2024-07-19	22:40		23:35	23:40	28	C295	78	Heavy	23199	2024-07-19 22:40:00	78
D	2024-07-19	23:15		23:57	23:49	28	C295	78	Heavy	23199	2024-07-19 23:15:00	78
A	2024-07-15	16:30	16:25	16:26	16:33	28	A333	407	Heavy	212000	2024-07-15 16:30:00	407
D	2024-07-15	17:00		17:44	17:36	28	A333	396	Heavy	212000	2024-07-15 17:00:00	407

Figura 3.4 - Exemplo de informação utilizada para três tipologias de aeronaves

Contudo, nem todas as colunas disponibilizadas eram necessárias para os objetivos deste estudo. O foco centrou-se no número de descolagens por modelo de aeronave e na

respetiva categoria de peso. Inicialmente, foi efetuada uma filtragem na base de dados de forma a ordenar os 134 modelos de aeronave por número de movimentos no aeroporto, considerando apenas as descolagens, visto que o FAARFIELD utiliza este parâmetro como dado de entrada. Assim, obteve-se uma lista completa com cada modelo de aeronave e o número total de descolagens durante o ano em análise (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 - Listagem dos oito modelos de aeronaves com mais descolagens

Modelo	B738	A320	B38M	A319	A20N	A21N	A321	E190
Descolagens	12007	5841	3705	2820	1936	1336	1160	398

3.5.1.2 Cenários para escolha do tráfego representativo

A intenção inicial seria introduzir todo o tráfego anual no FAARFIELD. Contudo, tal revelou-se impraticável, devido às limitações do software, que apenas permite a inserção de 40 modelos de aeronave. Para ultrapassar esta restrição e definir qual o cenário a considerar relativamente ao tráfego mais representativo, foram realizados vários testes hipotéticos para determinar a combinação mais representativa e condicionante para o dimensionamento do pavimento. Os testes efetuados consistiram na criação de três cenários distintos. No primeiro cenário foram considerados os quarenta modelos de aeronaves que registaram o maior número de movimentos no aeroporto. O segundo cenário foi constituído pelos quarenta modelos mais pesados presentes na base de dados. Finalmente, no terceiro cenário foi criada uma combinação que incluía trinta e dois modelos com maior número de movimentos e os oito modelos mais pesados de modo a criar um cenário que considerasse estas duas componentes principais. Nesta simulação, considerou-se, ainda, um pavimento aeroportuário típico mas hipotético (Figura 3.5).

A análise inicial revelou que, embora os aviões mais pesados apresentem um impacto unitário superior no pavimento, a frequência muito reduzida de movimentos destes modelos no aeroporto limita consideravelmente a sua influência global. Com base nesta constatação, optou-se por realizar os testes no FAARFIELD para quatro cenários distintos: o cenário A, constituído pelos oito modelos mais pesados; o cenário B, composto pelos trinta e dois modelos com maior número de movimentos; o cenário C, que inclui os quarenta modelos com maior número de movimentos; e o cenário A+B, que combina os trinta e dois modelos com mais movimentos com os oito modelos mais pesados.

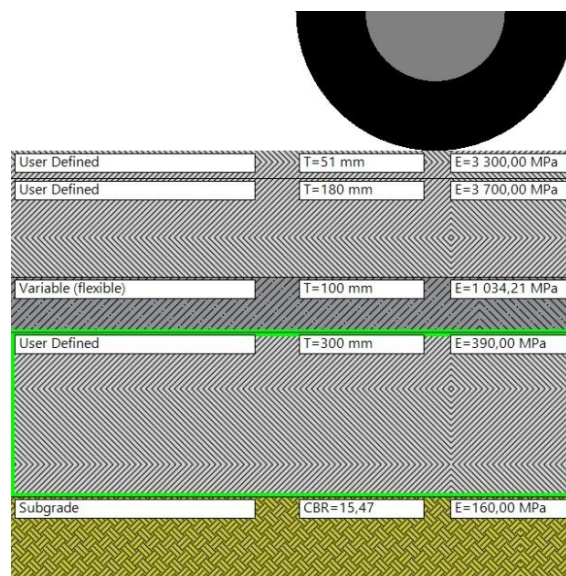


Figura 3.5 - Modelo estrutural de um pavimento aeroportuário

Os resultados obtidos demonstraram que, mesmo após a inclusão dos oito aviões mais pesados no terceiro cenário, estes não tiveram qualquer impacto relevante no dimensionamento e no PCR calculado, devido ao número extremamente reduzido de operações comparativamente aos modelos mais leves, mas com maior frequência (Tabela 3.2). Este facto confirma que, apesar do peso ser um fator importante para o desgaste do pavimento, a frequência das operações é um elemento determinante na análise global.

Tabela 3.2 - Número de passagens e valores de PCR calculados para diferentes combinações de aviões. A: 8 Aviões mais pesados B: 32 Aviões com mais passagens C: 40 Aviões com mais passagens A + B: 32 Aviões com mais passagens + 8 aviões mais pesados.

	A	B	C	A + B
Nr de passagens	16	32601	32923	32617
PCR calculado	3770/F/A/X/T	3770/F/A/X/T	1320/F/A/X/T	3770/F/A/X/T

Concluiu-se que o cenário mais impactante correspondeu à seleção baseada exclusivamente no maior número de movimentos, mesmo que alguns modelos possuam menor porte relativamente aos mais pesados. O valor de PCR para este cenário foi de 1320/F/A/X/T, enquanto o cenário combinado (trinta e dois modelos com mais movimentos e oito modelos mais pesados) apresentou um PCR de 3770/F/A/X/T (Tabela 3.2).

3.5.1.3 Escolha de modelos de aeronaves equivalentes

Outro desafio encontrado prendeu-se com a disponibilidade dos modelos na biblioteca do FAARFIELD. Alguns modelos presentes na base de dados original não estavam disponíveis no software. Nestes casos, procedeu-se à substituição por aeronaves equivalentes, escolhendo aeronaves da mesma marca, versões semelhantes (em alguns casos, modelos ligeiramente mais antigos) e características físicas equivalentes, como peso máximo à decolagem, distância entre rodas e configuração do trem de aterragem. As fontes de informação utilizadas foram: <https://www.gulfstream.com/en/aircraft/gulfstream-g500/> e <https://www.jetcraft.com/jetstream/2024/03/gulfstream-g550-overview-2003-2021/> (Tabela 3.3). Este processo permitiu manter a fidelidade ao cenário real, garantindo resultados muito próximos da realidade operacional do aeroporto.

Tabela 3.3 - Exemplo de substituição do modelo de aeronave GLEX presente nos dados obtidos através da entidade aeroportuária pelo Gulfstream V com características muito semelhantes.

Modelo	Peso vazio (kg)	MTOW (kg)	Trem de aterragem	FAARFIELD (Presente/Ausente)
Gulfstream G550 (GLEX)	22 100	41 300	Triciclo retrátil	Indisponível
Gulfstream V (G-V)	21 250	36 100	Triciclo retrátil	Presente

3.5.2 Tráfego Considerado para o Caso de Estudo

Após as várias simplificações e substituições efetuadas, considerou-se como tráfego de referência para o caso de estudo o conjunto dos 40 modelos de aeronaves com maior número de movimentos registados no aeroporto durante o ano de 2024 (ver Tabela 3.4). Esta opção assegura uma representação mais fiel da realidade operacional e reflete de forma adequada a influência da frequência de utilização da pista no dimensionamento do pavimento, fator que se revelou determinante face ao impacto limitado das aeronaves mais pesadas mas com reduzido número de operações.

Tabela 3.4 - Número de descolagens para diferentes modelos de aviões (ou avião similar considerado) no ano 2024. Modelos marcados a amarelo não disponíveis na biblioteca do FAARFIELD.

Modelo	Descolagens	Avião Semelhante
B738	12007	-
A320	5841	-
B38M	3705	-
A319	2820	-
A20N	1936	-
A21N	1336	-
A321	1160	-
E190	398	-
E55P	354	-
C56X	337	-
CL35	237	Bombardier cl 604
B733	219	-
A333	201	-
B737	193	-
A332	177	-
C25B	165	-
C68A	160	Cessna Citation vi vii
PC24	123	Cessna Citation v
E195	116	-
CL60	108	-
E550	105	Cessna Citation x
GLEX	103	Gulfstream gV
BE40	101	-
E35L	99	Erj 135
LJ45	98	-
B752	97	-
C25A	96	-
F2TH	83	-
C650	63	-
CRJ2	55	-
BCS3	55	-
J328	53	Crj100
GLF6	50	Gulfstream gV
PC12	49	Beechcraft king air 200
GLF5	39	Gulfstream gV
FA7X	39	Dassault falcon 900b
C680	39	Cessna citation X
H25B	37	-
C525	35	-
CL30	34	Bombardier cl604

3.6 Modelos Estruturais dos Pavimentos

3.6.1 Modelo de Referência (Ano 2000)

Para a definição do modelo estrutural do pavimento em análise, foi considerado como ponto de partida o modelo de referência de 2000, construído a partir da informação disponível à data e dos valores de módulos de elasticidade publicados no relatório técnico de 2000. A camada de sub-base foi considerada como camada de fundação. Atendendo a que não foram realizados ensaios recentes que permitissem atualizar estes parâmetros, optou-se por manter os mesmos valores de módulos de elasticidade na modelação atual.

A caracterização do pavimento em 2000 foi efetuada com base na constituição das camadas existente nas duas zonas da infraestrutura, apresentadas na Tabela 3.5 e Tabela 3.6, para Zona 1 e Zona 2, respetivamente (ver Figura 3.2).

Tabela 3.5 – Camadas, respetiva espessura e módulo de elasticidade da retroanálise (E_{RA}) na Zona 1, no ano 2000.

Zona 1		
Camadas	h (cm)	E_{RA} (MPa)
Misturas Betuminosas (AC14 Surf)	18	3700
Semi Penetração Betuminosa (AC20 Binder)	10	1000
Base ABGE	30	390
Sub-base ABGE (CBR > 13)	-	160

Tabela 3.6 - Camadas, respetiva espessura e módulo de elasticidade da retroanálise (E_{RA}) na Zona 2, no ano 2000.

Zona 2		
Camadas	h (cm)	E_{RA} (MPa)
Misturas Betuminosas (AC14 Surf)	23	3000
Semi Penetração Betuminosa (AC20 Binder)	10	1000
Base ABGE	30	330
Sub-base ABGE (CBR > 13)	-	110

3.6.2 Modelo Pós-Reforço

O reforço estrutural introduzido posteriormente foi representado pela inclusão de uma camada adicional de desgaste em ambas as zonas (ver Tabela 3.7 e Tabela 3.8).

Tabela 3.7 - Camadas, respetiva espessura (h) e módulo de elasticidade (E RA) na Zona 1, após reforço.

Zona 1		
Camadas	h (cm)	E RA (MPa)
Camada de desgaste (SMA11 Surf)	5,1	3300*
Misturas Betuminosas (AC14 Surf)	18	3700
Semi Penetração Betuminosa (AC20 Binder)	10	1000
Base ABGE	30	390
Sub-base ABGE (CBR > 13)	-	160

Tabela 3.8 - Camadas, respetiva espessura (h) e módulo de elasticidade (E RA) na Zona 2, após reforço.

Zona 2		
Camadas	h (cm)	E RA (MPa)
Camada de desgaste (SMA11 Surf)	5,1	3300*
Misturas Betuminosas (AC14 Surf)	23	3000
Semi Penetração Betuminosa (AC20 Binder)	10	1000
Base ABGE	30	330
Sub-base ABGE (8<CBR<13)	-	110

(*) para a camada de desgaste de 51 mm de reforço (não existia em 2000) foi adotado o módulo de $E = 3\,300$ MPa. Este foi assumido com base na composição do material (SMA11 SURF), nas condições locais de temperatura de projeto e nos valores habitualmente utilizados para este tipo de revestimento.

3.7 Modelação e Resultados do FAARFIELD

3.7.1 Limitações na definição do modelo estrutural FAARFIELD

O FAARFIELD apresenta restrições que limitam a sua capacidade de representar fielmente determinadas soluções construtivas. Entre as mais evidentes encontram-se a

impossibilidade de definir mais do que uma camada de desgaste, sujeita ainda a uma espessura mínima de 5,1 cm, o que impede a utilização direta de valores inferiores, como no caso do projeto em estudo, em que a espessura prevista era de 5,0 cm (Figura 3.6). Também no que respeita ao reforço, apenas é admitida uma camada, restringindo a modelação de estruturas mais complexas.

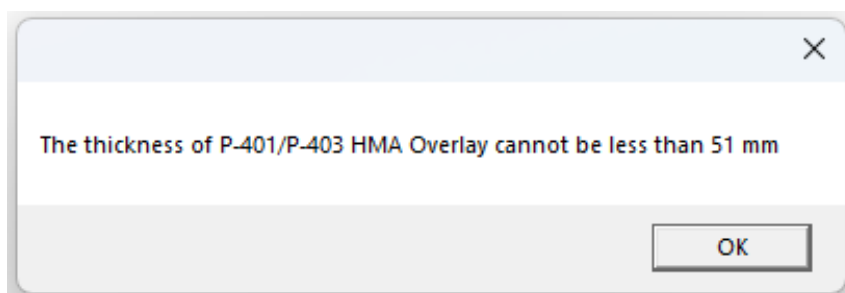


Figura 3.6 - Limitação do software FAARFIELD relativa à espessura da camada de desgaste

Outro aspeto crítico é a limitação do programa na parametrização dos materiais. Os módulos de elasticidade associados às camadas predefinidas não podem ser alterados, exceto o módulo da *Subgrade* (CBR) que pode ser definido com o valor real, ficando o utilizador limitado a ajustes de espessura (Figura 3.7), igualmente condicionados por limites mínimos e máximos impostos pelo software. Além disso, nem sempre é possível selecionar os materiais efetivamente utilizados no projeto (Figura 3.7), sendo necessário optar por alternativas aproximadas entre as opções sugeridas pelo FAARFIELD, o que foi efetuado para o caso de estudo (Tabela 3.9).

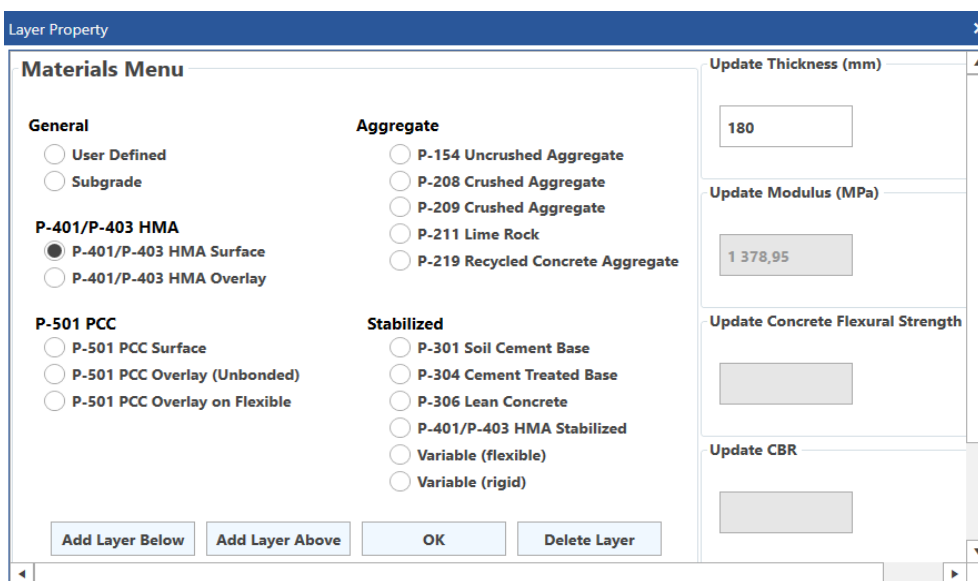


Figura 3.7 - Limitações nos materiais disponíveis e módulo de elasticidade

Tabela 3.9 - Materiais das camadas da pista e a sua correspondência aproximada no FAARFIELD.

Materiais das camadas da pista	Correspondência no FAARFIELD
Camada de desgaste (SMA11 Surf)	P-401/P-403 HMA Overlay
Misturas Betuminosas (AC14 Surf)	P-401/P-403 HMA Surface
Semi Penetração Betuminosa (AC20 Binder)	P-401/P-403 HMA Stabilized
Base ABGE	P-209 Crushed Aggregate
Sub-base ABGE	Subgrade

3.7.2 Cenários adotados para modelos estruturais no FAARFIELD

Perante estas limitações, a aplicação direta do FAARFIELD não permite reproduzir com exatidão a realidade do pavimento em análise. Para ultrapassar este constrangimento, optou-se por desenvolver uma versão alternativa em que todas as camadas foram definidas manualmente, recorrendo aos módulos determinados no processo de retroanálise. Neste enquadramento, concluiu-se ser pertinente a adoção de dois cenários complementares de análise: (1) Abordagem implícita FAARFIELD (limitativa), baseada nos materiais e valores de módulo recomendados pelo programa, representando uma solução mais conservadora (Tabela 3.10); e (2) Abordagem realista, construída a partir dos módulos aferidos no projeto original de 2000, assegurando a máxima proximidade à realidade do pavimento em estudo (Tabela 3.11).

Tabela 3.10 - Características das camadas FAARFIELD para uma abordagem implícita

Camadas FAARFIELD	E (MPa)
P-401/P-403 HMA Overlay	1378,95
P-401/P-403 HMA Surface	1378,95
P-401/P-403 HMA Stabilized	2757,9
P-209 Crushed Aggregate	292,18
Subgrade (zona 1/ zona 2)	160/110

Deste modo, foi possível estabelecer uma comparação crítica entre os resultados obtidos em cada abordagem, conciliando, por um lado, a robustez e a segurança da solução mais conservadora e, por outro, a fidelidade técnica do modelo realista às condições originais de projeto.

Tabela 3.11 - Características das camadas FAARFIELD para uma abordagem realista

Camadas FAARFIELD	E Zona 1 (MPa)	E Zona 2 (MPa)
Definido pelo Utilizador	3300	3300
Definido pelo Utilizador	3700	3000
Definido pelo Utilizador	1000	1000
Definido pelo Utilizador	390	330
Subgrade	160	110

3.7.3 Modelação Estrutural do ano de 2000

3.7.3.1 Zona 1 (pk0+000 a pk0+700)

Abordagem implícita FAARFIELD (Limitativa)

Na Zona 1, correspondente ao troço inicial da pista (pk0+000 a pk0+700), a aplicação da abordagem implícita do FAARFIELD conduziu a uma estrutura modelada com os parâmetros pré-definidos pelo software, distintos dos obtidos experimentalmente, mas aceites como referência para efeitos de cálculo. A constituição estrutural considerada encontra-se resumida na Tabela 3.12.

Tabela 3.12 - Constituição estrutural da Zona 1 com base na abordagem implícita FAARFIELD no ano 2000, com indicação da espessura (h), módulo de elasticidade da retroanálise (E RA) e módulo de elasticidade de FAARFIELD (E FAA).

Camadas	h real (cm)	h FAA (cm)	E RA (MPa)	E FAA (MPa)
Misturas Betuminosas (AC14 Surf)	18	18	3700	1379
Semi Penetração Betuminosa (AC20 Binder)	10	10	1000	2758
Base ABGE	30	30	390	466,8
Sub-base ABGE (CBR > 13)	-	-	160	160

A representação esquemática da composição estrutural resultante desta modelação encontra-se ilustrada na Figura 3.8, onde é possível observar a distribuição das camadas e respetivos módulos de elasticidade de acordo com as definições do programa. Para esta configuração, o valor obtido de PCR foi 990/F/A/X/T.

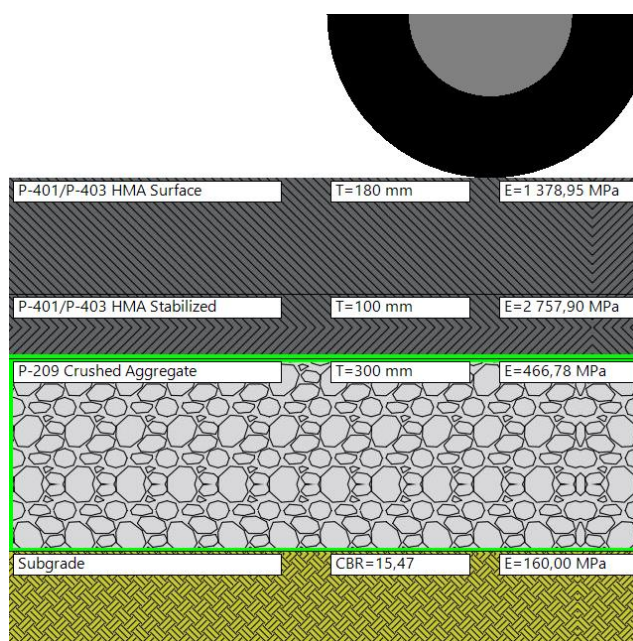


Figura 3.8 - Modelo estrutural do pavimento modelado com o FAARFIELD, para a zona 1, com base na abordagem implícita (ano 2000)

Abordagem realista FAARFIELD

No mesmo troço (Zona 1), aplicou-se a abordagem realista, em que os módulos do pavimento foram obtidos através de retroanálise, com base nos resultados dos ensaios de carga. Estes, foram definidos manualmente pelo utilizador no FAARFIELD de modo a refletir

os valores considerados no estudo de referência, resultando na configuração estrutural apresentada na Tabela 3.13.

Tabela 3.13 - Constituição estrutural da Zona 1 com base na abordagem realista FAARFIELD no ano 2000, com indicação da espessura (h), módulo de elasticidade da retroanálise (E RA) e módulo de elasticidade de FAARFIELD (E FAA).

Zona 1				
Camadas	h real (cm)	h FAA (cm)	E RA (MPa)	E FAA (MPa)
Definido pelo Utilizador	18	18	3700	3700
Definido pelo Utilizador	10	10	1000	1000
Definido pelo Utilizador	30	30	390	390
Sub-base ABGE (CBR > 13)	-	-	160	160

A composição visual da estrutura do pavimento modelada no FAARFIELD encontra-se representada na Figura 3.9. Nesta segunda abordagem, o resultado de PCR manteve-se igualmente em 990/F/A/X/T, coincidindo com o valor obtido na simulação anterior.

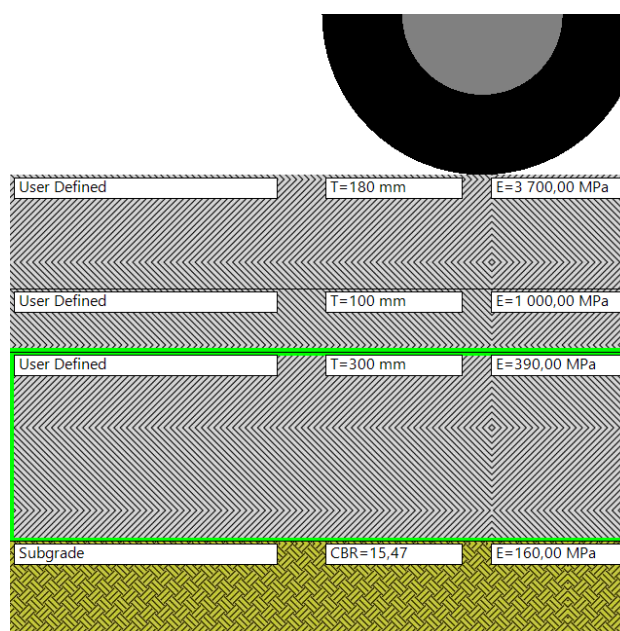


Figura 3.9 - Modelo estrutural do pavimento modelado com o FAARFIELD, para a zona 1, no ano 2000, com base na abordagem realista.

3.7.3.2 Zona 2 (pk0+700 a pk2+400)

Abordagem implícita FAARFIELD (Limitativa)

Na Zona 2, correspondente ao troço entre pk0+700 e pk2+400, a abordagem implícita do FAARFIELD considerou novamente os parâmetros pré-definidos pelo software, resultando na configuração estrutural apresentada na Tabela 3.14.

Tabela 3.14 - Constituição estrutural da Zona 2 com base na abordagem implícita FAARFIELD no ano 2000, com indicação da espessura (h), módulo de elasticidade da retroanálise (E RA) e módulo de elasticidade de FAARFIELD (E FAA).

Camadas	h real (cm)	h FAA (cm)	E RA (MPa)	E FAA (MPa)
Misturas Betuminosas (AC14 Surf)	23	23	3000	1379
Semi Penetração Betuminosa (AC20 Binder)	10	10	1000	2757,9
Base ABGE	30	30	330	359,3
Sub-base ABGE (8<CBR<13)	-	-	110	110

A disposição das diferentes camadas do pavimento, tal como foram modeladas no programa, encontra-se ilustrada na Figura 3.10. O resultado desta simulação foi um PCR de 880/F/B/X/T.

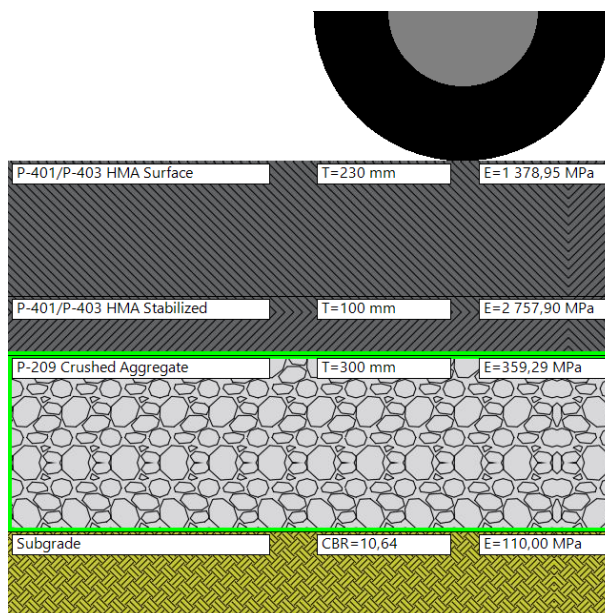


Figura 3.10 - Modelo estrutural do pavimento modelado com o FAARFIELD para a zona 2, no ano 2000, com base na abordagem implícita

Abordagem realista

De seguida, através da abordagem realista, foram introduzidos os módulos determinados no estudo de 2000, reproduzindo de forma mais fiel as condições do pavimento da época. A configuração estrutural resultante encontra-se resumida na Tabela 3.15 e representada visualmente na Figura 3.11. Também neste caso, o valor de PCR obtido foi de 880/F/B/X/T, verificando-se coincidência com o resultado da abordagem implícita.

Tabela 3.15 - Constituição estrutural da Zona 2 com base na abordagem realista FAARFIELD no ano 2000, com indicação da espessura (h), módulo de elasticidade da retroanálise (E RA) e módulo de elasticidade de FAARFIELD (E FAA).

Camadas	h real (cm)	h FAA (cm)	E RA (MPa)	E FAA (MPa)
Definido pelo Utilizador	23	23	3000	3000
Definido pelo Utilizador	10	10	1000	1000
Definido pelo Utilizador	30	30	330	330
Sub-base ABGE (8<CBR<13)	-	-	110	110

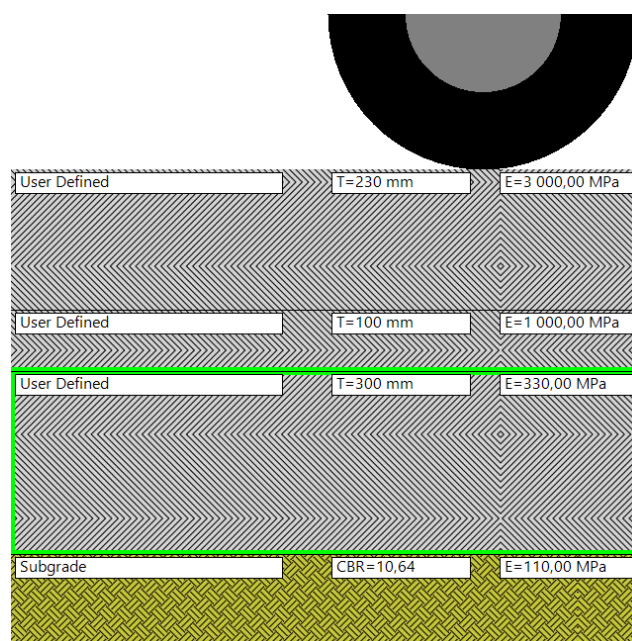


Figura 3.11 - Modelo estrutural do pavimento modelado com o FAARFIELD para a zona 2, no ano 2000, com base na abordagem realista.

3.7.4 Modelação Estrutural Pós Reforço

3.7.4.1 Zona 1 (pk0+000 a pk0+700)

Abordagem implícita FAARFIELD (Limitativa)

Na análise da fase pós-reforço foi considerada uma camada de reforço em SMA 11 Surf com cerca de 5 cm de espessura. Neste caso, para a Zona 1, o modelo implícito do FAARFIELD gerou a estrutura resumida na Tabela 3.16, a qual se encontra representada graficamente na Figura 3.12. A simulação desta configuração resultou num PCR de 1080/F/A/X/T.

Tabela 3.16 - Constituição estrutural da Zona 1 com base na abordagem implícita FAARFIELD na fase pós-reforço, com indicação da espessura (h), módulo de elasticidade da retroanálise (E RA) e módulo de elasticidade de FAARFIELD (E FAA).

Camadas	h (cm)	h FAA (cm)	E RA (MPa)	E FAA (MPa)
Camada de desgaste (SMA11 Surf)	5	5,1	3300	1379
Misturas Betuminosas (AC14 Surf)	18	18	3700	1379
Semi Penetração Betuminosa (AC20 Binder)	10	10	1000	2758
Base ABGE	30	30	390	466,8
Sub-base ABGE (CBR > 13)	-	-	160	160

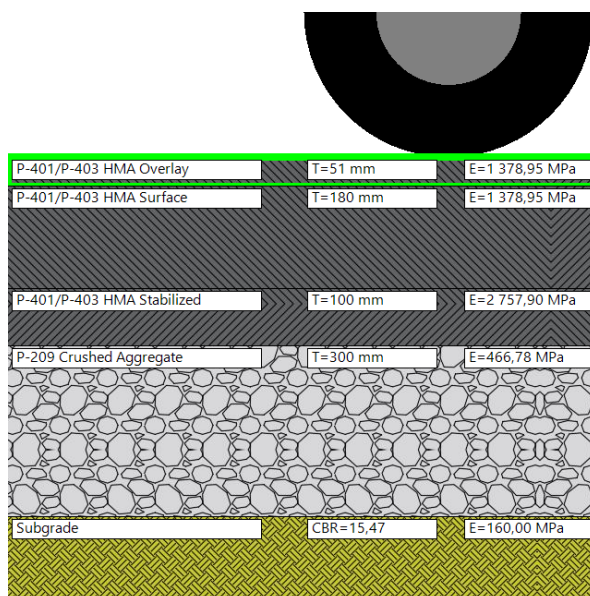


Figura 3.12 - Modelo estrutural do pavimento modelado com o FAARFIELD para a zona 1, pós reforço, com base na abordagem implícita.

Abordagem realista

Posteriormente, aplicando a abordagem realista, em que os módulos foram definidos pelo utilizador de acordo com os valores da retroanálise, obteve-se a estrutura descrita na Tabela 3.17, cuja representação se encontra na Figura 3.13. Para este caso, o valor de PCR foi de 1230/F/A/X/T, revelando uma diferença face ao resultado obtido na simulação mais conservadora.

Tabela 3.17 - Constituição estrutural da Zona 1 com base na abordagem realista FAARFIELD na fase pós-reforço, com indicação da espessura (h), módulo de elasticidade da retroanálise (E RA) e módulo de elasticidade de FAARFIELD (E FAA).

Camadas	h (cm)	h FAA (cm)	E RA (MPa)	E FAA (MPa)
Definido pelo Utilizador	5	5,1	3300	3300
Definido pelo Utilizador	18	18	3700	3700
Definido pelo Utilizador	10	10	1000	1000
Definido pelo Utilizador	30	30	390	390
Sub-base ABGE (CBR > 13)	-	-	160	160

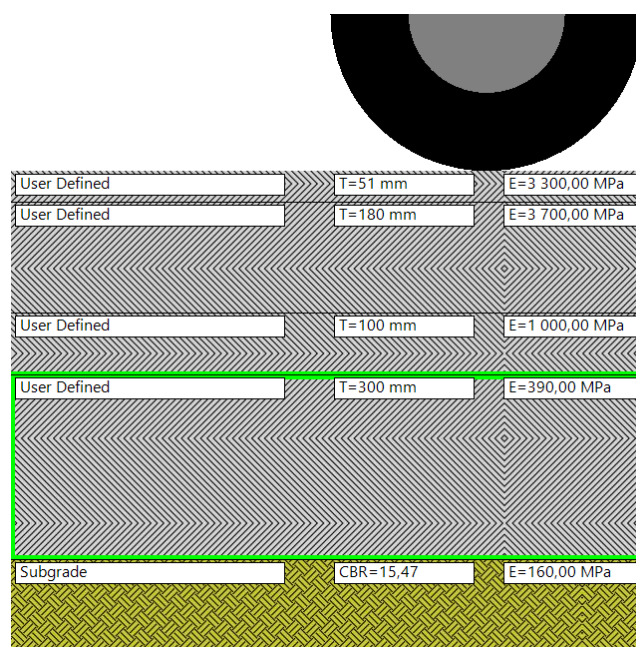


Figura 3.13 - Modelo estrutural do pavimento modelado com o FAARFIELD para a zona 1, pós reforço, com base na abordagem realista.

3.7.4.2 Zona 2 (pk0+700 a pk2+400)

Abordagem implícita FAARFIELD (Limitativa)

Na Zona 2, após a intervenção de reforço, a abordagem implícita gerou a constituição estrutural apresentada na Tabela 3.18 e ilustrada na Figura 3.14. O resultado do cálculo foi um PCR de 1000/F/B/X/T.

Tabela 3.18 - Constituição estrutural da Zona 2 com base na abordagem implícita FAARFIELD na fase pós-reforço, com indicação da espessura (h), módulo de elasticidade da retroanálise (E RA) e módulo de elasticidade de FAARFIELD (E FAA).

Camadas	h (cm)	h FAA (cm)	E RA (MPa)	E FAA (MPa)
Camada de desgaste (SMA11 Surf)	5	5,1	3300	1379
Misturas Betuminosas (AC14 Surf)	23	23	3000	1379
Semi Penetração Betuminosa (AC20 Binder)	10	10	1000	2757,9
Base ABGE	30	30	330	359,3
Sub-base ABGE (8<CBR<13)	-	-	110	110

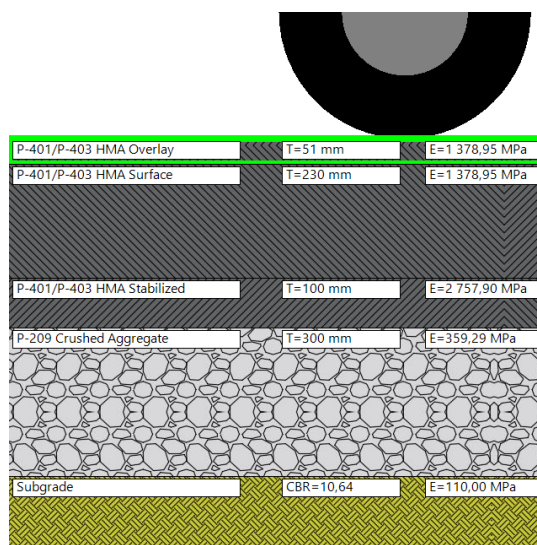


Figura 3.14 - Modelo estrutural do pavimento modelado com o FAARFIELD para a zona 2, pós reforço, com base na abordagem implícita.

Abordagem realista

Recorrendo à abordagem realista, os módulos foram novamente definidos pelo utilizador, tal como indicado na Tabela 3.19, sendo a respetiva composição apresentada na Figura 3.15. Nesta simulação, o PCR obtido foi de 1160/F/B/X/T, superior ao determinado pela abordagem implícita.

Tabela 3.19 - Constituição estrutural da Zona 2 com base na abordagem realista FAARFIELD na fase pós-reforço, com indicação da espessura (h), módulo de elasticidade da retroanálise (E RA) e módulo de elasticidade de FAARFIELD (E FAA).

Camadas	h (cm)	h FAA (cm)	E Real (MPa)	E FAA (MPa)
Definido pelo Utilizador	5	5,1	3300	3300
Definido pelo Utilizador	23	23	3000	3000
Definido pelo Utilizador	10	10	1000	1000
Definido pelo Utilizador	30	30	330	330
Sub-base ABGE (8<CBR<13)	-	-	110	110

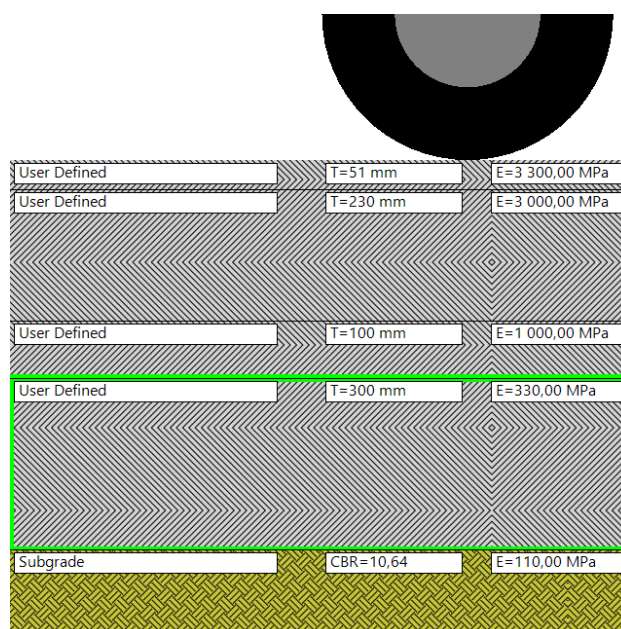


Figura 3.15 - Modelo estrutural do pavimento modelado com o FAARFIELD para a zona 2, pós reforço, com base na abordagem realista.

3.8 Avião Crítico

O Airbus A330-300 foi identificado como o avião crítico no presente estudo desenvolvido com o software FAARFIELD, uma vez que apresenta o valor de ACR mais elevado entre as aeronaves consideradas (Tabela 3.20). Esta característica justifica a sua seleção para a análise, dado que a definição de avião crítico se associa à imposição das condições de carga mais severas sobre o pavimento.

Importa, contudo, destacar que, apesar do A330-300 exibir um ACR superior relativamente às restantes aeronaves, este valor permanece sempre inferior ao PCR da infraestrutura aeroportuária. Esta relação garante que a aeronave pode operar em pista sem restrições, não comprometendo nem a segurança operacional nem a durabilidade estrutural do pavimento. A análise das cargas transmitidas pelo trem de aterragem, associada às dimensões da área de contacto dos pneus e à distribuição percentual do peso da aeronave nos diferentes conjuntos de rodas, reforça a representatividade da escolha do A330-300 como caso crítico (Figura 3.16; Clément Alloing, <https://www.flickr.com/photos/bycac/52620008799>).

Tabela 3.20 - Valores do ACR do avião para todos os cenários avaliados no ano 2000 e pós reforço.

2000		Pós Reforço	
Abordagem (Zona)	ACR A330 (FAA)	Abordagem (Zona)	ACR A330 (FAA)
Realista (0-700)	571,7	Realista (0-700)	571,7
Realista (700-2400)	597,5	Realista (700-2400)	597,5
Implícita (0-700)	571,7	Implícita (0-700)	571,7
Implícita (700-2400)	597,5	Implícita (700-2400)	597,5

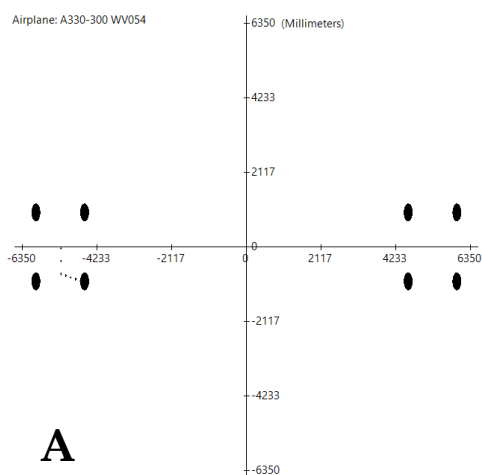


Figura 3.16 - (A) Configuração do trem principal (painel esquerdo, FAARFIELD) e (B) aspeto do avião crítico.

Assim, a seleção deste avião como crítico permitiu uma avaliação conservadora e robusta do desempenho do pavimento, assegurando que a infraestrutura apresenta capacidade suficiente para acomodar o tráfego previsto com adequada margem de segurança.

3.9 Síntese dos Resultados FAARFIELD

Apresenta-se em seguida, uma síntese dos resultados obtidos com o software FAARFIELD. Estes valores correspondem à avaliação do PCR e do ACR nas diferentes zonas da infraestrutura aeroportuária, considerando as situações de 2000 (Tabela 3.21) e pós-reforço (Tabela 3.22). É evidente o aumento nos valores PCR para a situação pós-reforço. Esse aumento varia entre 10 e 240, dependendo do cenário considerado.

Tabela 3.21 - Resultados do PCR e ACR para todos os cenários para o ano 2000.

2000		
Abordagem (Zona)	PCR (FAA)	ACR A330 (FAA)
Realista (0-700)	990/F/A/X/T	571,7
Realista (700-2450)	880/F/B/X/T	597,5
Implícita (0-700)	990/F/A/X/T	571,7
Implícita (700-2450)	880/F/B/X/T	597,5

Tabela 3.22 - Resultados do PCR e ACR para todos os cenários para o ano 2000.

Pós Reforço		
Abordagem (Zona)	PCR (FAA)	ACR A330 (FAA)
Realista (0-700)	1230/F/A/X/T	571,7
Realista (700-2450)	1160/F/B/X/T	597,5
Implícita (0-700)	1080/F/A/X/T	571,7
Implícita (700-2450)	1000/F/B/X/T	597,5

3.10 Modelo Linear Elástico

3.10.1 Processamento de dados no BISAR

O software BISAR foi utilizado para o cálculo das respostas mecânicas do pavimento sob a ação do tráfego aéreo, permitindo estimar as extensões e tensões críticas em diferentes camadas da estrutura. Os dados introduzidos resultaram da retroanálise e do dimensionamento obtido previamente, sendo ajustados para representar as condições reais de operação da infraestrutura (Figura 3.17). Este processamento constitui a base para a aplicação dos critérios de ruína definidos na literatura, nomeadamente fadiga e deformação

permanente, fundamentais para a avaliação do desempenho estrutural de pavimentos aeroportuários (Fontul, 2004; Lima, 2024).

The figure displays six screenshots of the BISAR 3.0 - Bitumen Stress Analysis in Roads software interface, organized into three rows and two columns. Each screenshot shows a different input screen for a specific case study.

Top Left: Caso de estudo Martin PCR compar
 System Description: Zona 1 2000
 Full Friction Between Layers? ☒
 No of Layers (1-10): 4

Layer Number	Thickness (m)	Modulus of Elasticity (MPa)	Poisson's Ratio
1	0.180	3.70E+03	0.35
2	0.100	1.00E+03	0.35
3	0.300	3.90E+02	0.35
4		1.60E+02	0.35

Top Right: Caso de estudo Martin PCR compar
 System Description: Zona 1 2024
 Full Friction Between Layers? ☒
 No of Layers (1-10): 5

Layer Number	Thickness (m)	Modulus of Elasticity (MPa)	Poisson's Ratio
1	0.050	3.30E+03	0.35
2	0.180	3.70E+03	0.35
3	0.100	1.00E+03	0.35
4	0.300	3.90E+02	0.35
5		1.60E+02	0.35

Middle Left: Caso de estudo Martin
 System Description: Zona 1 2000
 Use Standard Dual Wheel? ☐
 Mode of Load: 1 - Stress and Load
 No of Circular Loads (1-10): 1

Load Number	Vertical Stress (kPa)	Vertical Load (kN)	X Coordinate (m)	Y Coordinate (m)	Horizontal Stress (kPa)	Shear Direction (deg.)
1	1250.000	467.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0

Middle Right: Caso de estudo Martin PCR compar
 System Description: Zona 1 2000
 Use Standard Dual Wheel? ☐
 Mode of Load: 1 - Stress and Load
 No of Circular Loads (1-10): 1

Load Number	Vertical Stress (kPa)	Vertical Load (kN)	X Coordinate (m)	Y Coordinate (m)	Horizontal Stress (kPa)	Shear Direction (deg.)
1	1500.000	540.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0

Bottom Left: Caso de estudo Martin PCR compar
 System Description: Zona 1 2024
 Select Positions for Standard Dual Wheel
 No of Position Entries (1-10): 2

Position Number	X Coordinate (m)	Y Coordinate (m)	Z (depth) Coordinate (m)	Layer No.
1	0.0000	0.0000	0.2300	3
2	0.0000	0.0000	0.6301	5

Bottom Right: Caso de estudo Martin PCR compar
 System Description: Zona 1 2000
 Select Positions for Standard Dual Wheel
 No of Position Entries (1-10): 2

Position Number	X Coordinate (m)	Y Coordinate (m)	Z (depth) Coordinate (m)	Layer No.
1	0.0000	0.0000	0.1900	1
2	0.0000	0.0000	0.5801	4

Figura 3.17 - Exemplo de dados de entrada no programa BISAR das características das camadas, da carga aplicada sobre a superfície do pavimento e dos pontos onde se pretende determinar o critério de ruína.

3.10.2 Análise dos dados obtidos com o BISAR

3.10.2.1 Análise do ano 2000

No cenário correspondente ao ano 2000 procedeu-se ao cálculo do PCN com base nos pressupostos convencionais que consideram 10 000 recobrimentos e pressão de enchimento dos pneus de 1,25 MPa. Paralelamente, foi determinado o PCR, assumindo 36 500 recobrimentos e pressão de 1,5 MPa. Para efeitos de comparação, considerou-se ainda o ACN do avião crítico (A330-300), obtido a partir de tabelas oficiais (Figura 3.18) tal como o seu ACR a partir de dados anteriores obtidos no FAARFIELD.

Aircraft	Weight Max/Min [kN]	Load on one main gear [%]	Tire Pressure [MPa]	Flexible Pavement Subgrades CBR [%]				Rigid Pavement Subgrades k [MPa/m]				$\frac{S_T}{S_B}$ [cm]
				High	Medium	Low	V.Low	High	Medium	Low	V.Low	
				A	B	C	D	A	B	C	D	
				15	10	6	3	150	80	40	20	
A330-300	2264 1697		1.42	62 44	68 47	79 53	107 70	54 39	62 43	74 50	86 58	

Figura 3.18 - Parâmetros e valores do ACN do avião crítico A330-300 (Fonte: Transport Canada, Technical Evaluation Engineering).

No cálculo do PCN (Tabela 3.23), o valor da extensão à tração na base da camada de mistura betuminosa $\epsilon_c \approx 1434 \times 10^{-6}$ foi obtido por um processo que se baseou no cálculo iterativo, por tentativa e erro, ajustando os valores da carga vertical até que a condição de extensão calculada se aproximasse do valor limite de fadiga admissível fadiga (1436×10^{-6}) sem o ultrapassar. Refere-se que a camada de semipenetração betuminosa foi considerada como camada não ligada, assim a extensão à tração foi calculada na camada sobrejacente. Desta forma, o PCN determinado torna-se o mais representativo possível da condição real, garantindo uma avaliação conservadora. A verificação confirma que a deformação permanente é o critério condicionante, uma vez que se encontra muito próximo do limite, enquanto a fadiga apresenta ainda uma margem de segurança considerável, não sendo crítica neste cenário.

Tabela 3.23 - Cálculo do PCN nas Zona 1 e Zona 2, para o ano 2000.

Cálculo PCN											Código PCN	ACN e PCN Real		
Vb	E (MPa)	P (kN)	$e_t \times 10^{-6}$	Limite (fadiga)	verif.	$e_c \times 10^{-6}$	Limite ec (def. perm.)	verif.	PCN	II (DW)		Aeronave	ACN mínimo	Real 2020
12	3 700	467	326,3	646	ok	1434,0	1436	ok	93	10000	93/F/A/W/T	A330-300	62	82
12	3 000	422	354,6	697	ok	1434,0	1436	ok	84	10000	84/F/B/W/T	A330-300	68	68

No cálculo do PCR (Tabela 3.24) foi feito novamente o mesmo processo iterativo, concluindo assim que a deformação permanente também é o critério condicionante.

Tabela 3.24 - Cálculo do PCR na Zona 1 e Zona 2 no ano 2000.

Cálculo PCR											Código PCR	ACR	
Vb	E (MPa)	P (kN)	$e_t \times 10^{-6}$	Limite et (fadiga)	verif.	$e_c \times 10^{-6}$	Limite ec (def. perm.)	verif.	PCR	II (DW)		Aeronave	ACR mínimo
12	3 700	359	356,3	499	ok	1192,0	1192	ok	718	36500	718/F/A/W/T	A330-300	572
12	3 000	331	362,4	538	ok	1190,0	1192	ok	662	36500	662/F/B/W/T	A330-300	598

Assim, obtiveram-se as classificações de PCN e PCR representativas da infraestrutura em 2000, 93/F/A/W/T e 718/F/A/W/T para a zona 1 e 84/F/A/W/T e 662/F/A/W/T para a zona 2, que permitem a comparação direta com os valores de ACN extraídos de tabelas oficiais.

3.10.2.2 Análise Após Reforço (2024)

No cenário subsequente, correspondente ao período após o reforço da infraestrutura, o procedimento de cálculo manteve-se análogo ao apresentado para o ano 2000, aplicando-se a mesma metodologia iterativa de aproximação ao limite de fadiga.

À semelhança do ponto anterior, foi determinado o PCN e o PCR considerando as novas condições estruturais (aumento da camada betuminosa em 5 cm), sendo novamente avaliado o critério de fadiga como condicionante (Tabela 3.25 e Tabela 3.26).

Tabela 3.25 - Cálculo do PCN na Zona 1 e Zona 2 após reforço.

Cálculo PCN											Código PCN	ACN e PCN Real		
Vb	E (MPa)	P (kl)	$e_t \times 10^{-6}$	Limite (fadiga)	verif.	$e_c \times 10^{-6}$	Limite ec (def. perm.)	verif.	PCN	II (DW)		Aeronave	ACN mínimo	Real 2020
12	3 700	585	345,3	646	ok	1435,0	1436	ok	117	10000	117/F/A/W/T	A330-300	62	82
12	3 000	528	366,9	697	ok	1435,0	1436	ok	106	10000	106/F/B/W/T	A330-300	68	68

Tabela 3.26 - Cálculo do PCR na Zona 1 e Zona 2 após reforço.

Cálculo PCR											Código PCR	ACR	
Vb	E (MPa)	P (kl)	$e_t \times 10^{-6}$	Limite et (fadiga)	verif.	$e_c \times 10^{-6}$	Limite ec (def. perm.)	verif.	PCR	II (DW)		Aeronave	ACR mínimo
12	3 700	448	361,6	499	ok	1190,0	1192	ok	896	36500	896/F/A/W/T	A330-300	572
12	3 000	413	364,2	538	ok	1190,0	1192	ok	826	36500	826/F/B/W/T	A330-300	598

Verifica-se que, após o reforço, os valores obtidos para o PCN e PCR aumentaram significativamente, sendo 117/F/A/W/T e 896/F/A/W/T para a zona 1 e 106/F/A/W/T e 826/F/A/W/T, confirmando que a resistência do pavimento aumentou com a aplicação do reforço. A deformação permanente continuou a ser o fator mais próximo da ruína, sendo o principal mecanismo condicionante.

3.10.3 Síntese dos Resultados Obtidos com o BISAR

Para comparar de forma fácil os resultados obtidos com o software BISAR, apresenta-se em seguida uma tabela resumo, onde se reúnem os valores finais de PCN e PCR determinados para cada cenário (Tabela 3.27). Esta síntese permite comparar, de forma imediata, o comportamento da infraestrutura em cada fase (Ano 2000 e Ano Após Reforço), bem como identificar o critério que se revelou mais condicionante em cada caso.

Tabela 3.27 - Resumo dos valores de PCN e PCR para as duas zonas e períodos.

Cenário	Zona	PCN	Critério Condicionante	PCR	Critério Condicionante
Ano 2000	Zona 1	93/F/A/W/T	Deformação Permanente	718/F/A/W/T	Deformação Permanente
	Zona 2	84/F/B/W/T	Deformação Permanente	662/F/B/W/T	Deformação Permanente
Ano Após Reforço	Zona 1	117/F/A/W/T	Deformação Permanente	896/F/A/W/T	Deformação Permanente
	Zona 2	106/F/B/W/T	Deformação Permanente	816/F/B/W/T	Deformação Permanente

3.11 Estudo de Sensibilidade aos Critérios de Dimensionamento

3.11.1 Enquadramento

Nesta secção são analisados os cálculos do PCR e PCN, unicamente da Zona 1, tendo em conta critérios de ruína diferentes de modo a criar uma aproximação, se possível, dos valores de PCR do modelo linear elástico aos valores de PCR do FAARFIELD de modo a saber qual o critério mais condicionante. Esta análise tem a diferença entre os módulos de elasticidade das camadas granulares, 120 MPa usando o critério de fadiga e 180 MPa utilizando o critério da deformação permanente. Para além desta mudança de módulos da estrutura inicial, foi também retirada a camada de penetração betuminosa.

3.11.2 Critério de Fadiga

A fadiga constitui um dos mecanismos mais relevantes de degradação estrutural em pavimentos, caracterizada pelo fendilhamento progressivo das camadas ligadas devido às repetições de carga. A metodologia adotada baseou-se novamente no cálculo iterativo, por tentativa e erro. A estrutura do pavimento considerada é constituída por três camadas, uma betuminosa, uma granular e uma de subgrade (Figura 3.19). Tal como mencionado anteriormente foi utilizado um módulo de elasticidade de 120 MPa para a camada granular.

*** Caso de estudo Martin PCR FAD Compar

Number of Systems (1-10): 4

System Description: Zona 1 2000

Full Friction Between Layers? ☒

No of Layers (1-10): 3

Layer Number	Thickness (m)	Modulus of Elasticity (MPa)	Poisson's Ratio
1	0.180	3.70E+03	0.35
2	0.300	1.20E+02	0.35
3		1.60E+02	0.35

A

*** Caso de estudo Martin PCR FAD Compar

Number of Systems (1-10): 4

System Description: Zona 1 2024

Full Friction Between Layers? ☒

No of Layers (1-10): 4

Layer Number	Thickness (m)	Modulus of Elasticity (MPa)	Poisson's Ratio
1	0.050	3.30E+03	0.35
2	0.180	3.70E+03	0.35
3	0.300	1.20E+02	0.35
4		1.60E+02	0.35

B

Figura 3.19 - A: Estrutura do pavimento considerada para o ano de 2000 na Zona 1; e B: Estrutura do pavimento considerada para o ano de 2024 (após reforço) na Zona 1.

3.11.2.1 Ano 2000

No cenário correspondente ao ano 2000 procedeu-se ao cálculo do PCN e do PCR com base nos pressupostos convencionais recobrimentos e pressão de enchimento correspondentes. Considerou-se, tal como no subcapítulo anterior, o ACN e ACR do avião crítico. Obtiveram-se os códigos de PCN e PCR representativos da infraestrutura em 2000, que são, respetivamente, 45/F/A/W/T e 242/F/A/W/T (Tabelas 3.28 e 3.29), e que permitem a comparação direta com os valores de ACN extraídos de tabelas oficiais.

Tabela 3.28 - Cálculo do PCN na Zona 1 para o ano 2000. As células marcadas a amarelo indicam o critério de ruína e o respetivo PCN.

Cálculo PCN										Código PCN	ACN	
Vb	E (MPa)	P (kN)	$e_c \times 10^{-6}$	Limite et (fadiga)	verif.	$e_c \times 10^{-6}$	Limite ec (def. perm.)	verif.	PCN	N (DW)	Aeronave	ACN mínimo
12	3 700	227	643,5	646	ok	1063,0	1436	ok	45	10000	A330-300	62

Tabela 3.29 - Cálculo do PCR na Zona 1 para o ano 2000. As células marcadas a amarelo indicam o critério de ruína e o respetivo PCR.

Cálculo PCR										Código PCR	ACR	
Vb	E (MPa)	P (kN)	$e_c \times 10^{-6}$	Limite et (fadiga)	verif.	$e_c \times 10^{-6}$	Limite ec (def. perm.)	verif.	PCR	N (DW)	Aeronave	ACR
12	3 700	121	496,0	499	ok	610,8	1192	ok	242	36500	A330-300	572

3.11.2.2 Após Reforço

Após o reforço da infraestrutura, o procedimento de cálculo manteve-se análogo ao apresentado para o ano 2000, aplicando-se a mesma metodologia. Foram determinados o PCN e o PCR considerando as novas condições estruturais, sendo novamente avaliado o critério de fadiga como condicionante (Tabelas 3.30 e 3.31). Verifica-se que, após o reforço, os valores obtidos para o PCN e PCR foram de 74/F/A/W/T e 380/F/A/W/T, respectivamente.

Tabela 3.30 - Cálculo do PCN na Zona 1, pós reforço. As células marcadas a amarelo indicam o critério de ruína e o respectivo PCN.

Cálculo PCN											Código PCN	ACN	
Vb	E (MPa)	P (kN)	$e_t \times 10^{-6}$	Limite e_t (fadiga)	verif.	$e_c \times 10^{-6}$	Limite e_c (def. perm.)	verif.	PCN	N (DW)		Aeronave	ACN mínimo
12	3 700	370	643,9	646	ok	1229,0	1436	ok	74	10000	74/F/A/W/T	A330-300	62

Tabela 3.31 - Cálculo do PCR na Zona 1, pós reforço. As células marcadas a amarelo indicam o critério de ruína e o respectivo PCR.

Cálculo PCR											Código PCR	ACR	
Vb	E (MPa)	P (kN)	$e_t \times 10^{-6}$	Limite e_t (fadiga)	verif.	$e_c \times 10^{-6}$	Limite e_c (def. perm.)	verif.	PCR	N (DW)		Aeronave	ACR
12	3 700	190	486,9	499	ok	695,5	1192	ok	380	36500	380/F/A/W/T	A330-300	572

3.11.3 Critério de Deformação Permanente

Para além do critério de fadiga, foi também avaliado o critério de ruína pela deformação permanente, aplicando-se a mesma metodologia apresentada anteriormente, agora considerando as deformações acumuladas no solo de fundação. A estrutura do pavimento considerada é constituída por três camadas, uma betuminosa, uma granular e uma de subgrade (Figura 3.20). Foi usado o módulo de 180 MPa para a camada granular, distinto do valor considerado para o critério de ruína, que foi de 120 MPa.

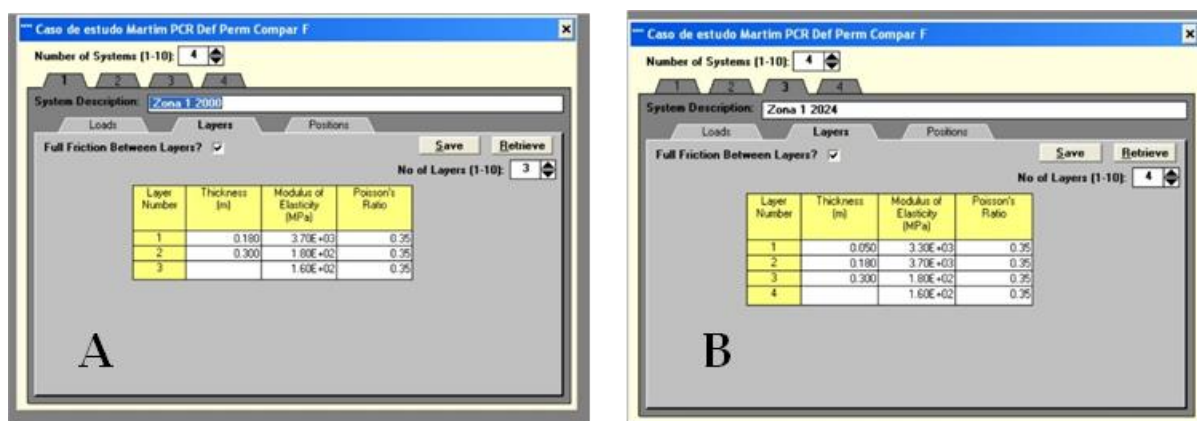


Figura 3.20 - Estrutura do pavimento na Zona 1 considerada para o ano de 2000 (A) e após reforço (B).

3.11.3.1 Ano 2000

No cenário correspondente ao ano 2000, os cálculos de PCN revelaram que a deformação permanente assumiu-se como o fator mais condicionante (Tabela 3.32). De facto, os valores obtidos para a extensão vertical situaram-se muito próximos do limite admissível, confirmando que este mecanismo de ruína apresenta maior influência estrutural na condição inicial da infraestrutura. No entanto, ao calcular o PCR, observou-se que foi a fadiga a apresentar-se como o primeiro critério a atingir o erro, passando assim a ser a condição determinante para este indicador (Tabela 3.33).

Tabela 3.32 - Cálculo do PCN na Zona 1 no ano 2000. As células marcadas a amarelo indicam o critério de ruína e o respetivo PCN.

Cálculo PCN											Código PCN	PCN	
Vb	E (MPa)	P (kN)	$e_s \times 10^{-6}$	Limite (fadiga)	verif.	$e_c \times 10^{-6}$	Limite ec (def. perm.)	verif.	PCR	N (DW)		Aeronave	PCN mínimo
12	3 700	308	643,9	646	ok	1434,0	1436	ok	62	10000	62/F/A/W/T	A330-300	62

Tabela 3.33 - Cálculo do PCR na Zona 1 no ano 2000. As células marcadas a amarelo indicam o critério de ruína e o respetivo PCR.

Cálculo PCN											Código PCR	ACR	
Vb	E (MPa)	P (kN)	$e_s \times 10^{-6}$	Limite (fadiga)	verif.	$e_c \times 10^{-6}$	Limite ec (def. perm.)	verif.	PCR	N (DW)		Aeronave	ACR mínimo
12	3 700	146	498,8	499	ok	763,3	1192	ok	292	36500	292/F/A/W/T	A330-300	572

Esta diferença de condicionamento entre PCN e PCR reforça a importância de analisar ambos os critérios, garantindo uma avaliação conservadora e representativa da realidade estrutural. Os códigos de PCN e PCR representativos da infraestrutura em 2000, de acordo com os critérios determinantes foram de 62/F/A/W/T e 292/F/A/W/T, respectivamente.

3.11.3.2 Após Reforço

O processo de cálculo foi repetido para o cenário após o reforço da infraestrutura. Os resultados mostraram novamente que, no que se refere ao PCN, a deformação permanente continuou a ser o fator mais relevante (Tabela 3.34), confirmando também a melhoria das condições estruturais após a intervenção. Já no cálculo do PCR, manteve-se a tendência observada no cenário inicial, sendo a fadiga o critério de ruína condicionante, sendo o primeiro a ultrapassar o limite admissível (Tabela 3.35).

Tabela 3.34 - Cálculo do PCR na Zona 1 no ano 2000. As células marcadas a amarelo indicam o critério de ruína e o respectivo PCR.

Cálculo PCN											Código PCN	PCN	
Vb	E (MPa)	P (kN)	$e_t \times 10^{-6}$	Limite (fadiga)	verif.	$e_c \times 10^{-6}$	Limite ec (def. perm.)	verif.	PCR	N (DW)		Aeronave	PCN mínimo
12	3 700	420	606,3	646	ok	1435,0	1436	ok	84	10000	84/F/A/W/T	A330-300	62

Tabela 3.35 - Cálculo do PCR na Zona 1, após reforço. As células marcadas a amarelo indicam o critério de ruína e o respectivo PCR.

Cálculo PCR											Código PCR	ACR	
Vb	E (MPa)	P (kN)	$e_t \times 10^{-6}$	Limite et (fadiga)	verif.	$e_c \times 10^{-6}$	Limite ec (def. perm.)	verif.	PCR	N (DW)		Aeronave	ACR mínimo
12	3 700	232	497,7	499	ok	883,6	1192	ok	464	36500	464/F/A/W/T	A330-300	572

Conclui-se que, enquanto o PCN é sobretudo condicionado pela deformação permanente, o PCR é governado pelo critério de fadiga, mesmo após o reforço estrutural. Esta constatação reforça a necessidade de considerar ambos os mecanismos de ruína, uma vez que cada indicador reflete diferentes aspectos da resposta estrutural do pavimento.

3.11.4 Cálculo do PCR no FAARFIELD

Procedeu-se ao cálculo do PCR através do software FAARFIELD, considerando a Zona 1 nos cenários de 2000 e após o reforço. Tal como anteriormente, foi adotado um módulo de elasticidade de 120 MPa para o critério de fadiga e de 180 MPa para o critério de deformação permanente.

Para o ano 2000, os valores de PCR obtidos foram:

- (a) Critério de Fadiga (120 MPa): 680/F/A/X/T;
- (b) Critério de Deformação Permanente (180 MPa): 640/F/A/X/T.

Após o reforço estrutural, verificou-se um aumento significativo da capacidade de carga, tendo-se obtido:

- (a) Critério de Fadiga (120 MPa): 990/F/A/X/T;
- (b) Critério de Deformação Permanente (180 MPa): 920/F/A/X/T.

3.11.5 Considerações finais do Estudo de Sensibilidade

Para consolidar os resultados obtidos, apresentam-se em seguida duas tabelas resumo, onde se reúnem os valores finais de PCN e PCR determinados para cada cenário, segundo os dois critérios de ruína analisados: fadiga e deformação permanente, tanto para o modelo linear elástico como para o FAARFIELD. Esta síntese permite comparar, de forma imediata, o comportamento da infraestrutura em cada fase (Ano 2000 e Ano Após Reforço), bem como identificar o critério que se revelou mais condicionante em cada caso (Tabelas 3.36 e 3.37).

Tabela 3.36 - Resumo dos valores de PCN e PCR segundo o critério de fadiga.

Cenário	PCN (condicionado por fadiga)	Critério Condicionante Final	PCR (condicionado por fadiga)	Critério Condicionante Final	PCR FAARFIELD
Ano 2000	45/F/A/W/T	Fadiga	242/F/A/W/T	Fadiga	680/F/A/X/T
Ano Após Reforço	74/F/A/W/T	Fadiga	380/F/A/W/T	Fadiga	990/F/A/X/T

Tabela 3.37 - Resumo dos valores de PCN e PCR segundo o critério de deformação permanente

Cenário	PCN (condicionado por def. perm.)	Critério Condicionante Final	PCR (condicionado por def. perm.)	Critério Condicionante Final	PCR FAARFIELD
Ano 2000	62/F/A/W/T	Deformação Permanente	292/F/A/W/T	Fadiga	640/F/A/X/T
Ano Após Reforço	84/F/A/W/T	Deformação Permanente	464/F/A/W/T	Fadiga	920/F/A/X/T

A análise comparativa demonstra as diferenças entre os resultados do FAARFIELD e do modelo linear elástico. No caso da deformação permanente, a razão entre os valores de PCN e PCR obtidos pelo FAARFIELD apresenta valores próximos de $\times 10$ ($640/62 \approx 10,3$ e $920/84 \approx 10,9$), enquanto que para a fadiga a razão é mais elevada, entre $\times 13$ e $\times 15$ ($680/45 \approx 15,1$ e $990/74 \approx 13,4$). Quando se compara diretamente o PCR do modelo linear elástico (MLE) com o do FAARFIELD, observa-se que os valores do MLE representam apenas 35,6% e 38,4% dos valores do FAARFIELD para fadiga e 45,6% e 50,4% para deformação permanente, respetivamente em 2000 e após o reforço. Além disso, as diferenças absolutas são mais acentuadas na fadiga correspondendo a aumentos de 160% a 180% do que na deformação permanente, equivalentes a 98% a 120%. Conclui-se, assim, que não existe uma relação direta entre os valores de PCN e PCR obtidos pelos dois métodos; no entanto, observa-se alguma proporcionalidade quando o critério de ruína é a deformação permanente. Observa-se, em todos os cenários analisados, que os valores de PCR obtidos pelo FAARFIELD são muito superiores aos determinados pelo modelo linear elástico.

3.12 Análise Comparativa Final

Nesta secção são apresentadas as tabelas comparativas finais dos valores de PCN e PCR, obtidos a partir de diferentes fontes, cenários e períodos de análise. O objetivo é consolidar, de forma organizada, todos os resultados do estudo, facilitando a comparação entre os valores publicados e os calculados.

A Tabela 3.38 sintetiza os valores de PCN, contemplando os dados publicados em 2000 e 2020, o valor mais recente disponível, bem como os resultados determinados segundo o modelo linear elástico. A Tabela 3.39 reúne os valores de PCR das análises para as diferentes zonas da pista, tanto no cenário inicial (ano 2000) como após o reforço. Desta forma, as tabelas

finais permitem uma leitura clara da evolução da capacidade estrutural do pavimento, avaliada de acordo com os vários métodos utilizados.

Tabela 3.38 - Síntese dos valores de PCN para as Zonas 1 e 2.

PCN					
Cenário	Ensaio 2000	Publicado 2020	Valor mais recente	Modelo Linear Elástico 2000	Modelo Linear Elástico após reforço
Zona 1	82/F/A/W/T	80/F/A/W/T	137/F/B/W/T	93/F/A/W/T	117/F/A/W/T
Zona 2	68/F/B/W/T	80/F/A/W/T	137/F/B/W/T	84/F/B/W/T	106/F/B/W/T

Tabela 3.39 - Síntese de valores de PCR para as Zonas 1 e 2.

PCR						
Cenário	M. Linear Elástico 2000	M. Linear Elástico após reforço	2000 – Realista	2000 – Implícita	Pós Reforço – Realista	Pós Reforço – Implícita
Zona 1	718/F/A/W/T	896/F/A/W/T	990/F/A/X/T	990/F/A/X/T	1230/F/A/X/T	1080/F/A/X/T
Zona 2	662/F/B/W/T	816/F/B/W/T	880/F/B/X/T	880/F/B/X/T	1160/F/B/X/T	1000/F/B/X/T

A análise dos resultados obtidos permite verificar que o reforço estrutural contribuiu de forma significativa para o aumento da capacidade do pavimento, tanto nos valores de PCN como nos de PCR, em todas as metodologias consideradas. No caso do PCN, os acréscimos percentuais determinados através do modelo linear elástico foram de 20,51% na Zona 1 e 20,75% na Zona 2, o que evidencia um comportamento muito equilibrado entre ambas as zonas e demonstra que o reforço produziu melhorias consistentes e uniformes na capacidade estrutural do pavimento.

Relativamente ao PCR, também se observam aumentos percentuais significativos, embora com variações consoante o método de cálculo aplicado. No Modelo Linear Elástico (PCR MLE), os acréscimos foram de 19,87% na Zona 1 e 18,87% na Zona 2, valores próximos dos registados em PCN, confirmando a consistência entre os dois indicadores. Já no método Realista, os valores aumentaram 19,51% na Zona 1 e 24,14% na Zona 2, demonstrando que este método é mais sensível às melhorias estruturais, sobretudo na Zona 2. Por fim, no método Implícito, os aumentos foram mais conservadores, com 8,33% na Zona 1 e 12,00% na Zona 2,

traduzindo uma abordagem mais cautelosa quanto à estimativa da capacidade estrutural após o reforço.

De forma global, conclui-se que o reforço melhorou a capacidade estrutural em todas as zonas e metodologias analisadas, sendo essa melhoria particularmente evidente nos métodos PCN e PCR Realista. Além disso, verifica-se que os métodos Implícitos apresentam os resultados mais conservadores, ao passo que os métodos Realistas refletem de forma mais expressiva o efeito do reforço na capacidade estrutural do pavimento.

3.13 Considerações finais

Os pavimentos aeroportuários revelam-se, atualmente, uma temática de grande interesse científico e técnico, acompanhando o crescimento do transporte aéreo e a necessidade de garantir padrões elevados de segurança e eficiência operacional. Este estudo demonstrou a relevância da análise estrutural de pistas, tanto do ponto de vista do acompanhamento histórico da sua evolução, como da aplicação de ferramentas computacionais de dimensionamento e avaliação.

A comparação entre os valores de PCN publicados e aqueles reportados pela entidade aeroportuária, com base em dados de campo, evidenciou discrepâncias. Esta constatação reforça a importância de proceder a avaliações independentes e regulares, de modo a garantir que os valores utilizados para suportar a operação aeroportuária refletem a realidade estrutural da infraestrutura.

Relativamente ao tráfego aéreo, verificou-se que as aeronaves mais leves, quando associadas a um elevado número de movimentos, podem ter um impacto cumulativo superior ao de aeronaves mais pesadas, mas com frequência reduzida. Contudo, o Airbus A330-300 destacou-se como aeronave mais condicionante neste estudo, devido ao seu porte e número de passagens, confirmando-se como o avião crítico para a avaliação do pavimento.

No que respeita às ferramentas utilizadas, o software FAARFIELD mostrou-se de utilização intuitiva e capaz de fornecer resultados próximos da realidade, embora apresente limitações relevantes, nomeadamente a impossibilidade de definir composições de camadas reais, restrições quanto às espessuras mínimas e a simplificação da definição de materiais. A opção de utilizar o modo “Definido pelo Utilizador” permitiu contornar parcialmente estas limitações, aproximando as simulações dos módulos de elasticidade efetivos e fornecendo resultados mais realistas. Ainda assim, o programa não contempla fatores como condições

atmosféricas ou localização geográfica, o que impõe reservas adicionais à interpretação dos resultados.

Na determinação do PCR, verificou-se que a abordagem implícita do FAARFIELD assume uma postura mais conservadora, resultando geralmente em valores inferiores aos obtidos na abordagem realista. Para o ano 2000, observou-se a coincidência dos resultados entre ambas as abordagens, mas após o reforço verificaram-se diferenças relevantes, explicadas pela discrepância entre os módulos assumidos pelo FAARFIELD e os módulos reais retro analisados.

A análise efetuada através do modelo linear elástico (BISAR) permitiu compreender o comportamento estrutural do pavimento aeroportuário nas condições de 2000 e após o reforço de 2024. Verificou-se que, em todos os cenários e zonas analisadas, a deformação permanente se destacou como o critério mais condicionante de ruína, uma vez que os valores calculados se aproximaram do limite admissível, enquanto a fadiga apresentou margens de segurança superiores. Tanto o PCN como o PCR aumentaram de forma significativa após o reforço, confirmando a eficácia da intervenção e evidenciando a melhoria da capacidade estrutural da infraestrutura. Os resultados obtidos demonstram a sensibilidade do método linear elástico às condições das camadas granulares e à espessura das camadas betuminosas, validando a sua utilidade como ferramenta preliminar de dimensionamento e avaliação de desempenho.

A comparação entre o modelo linear elástico e o FAARFIELD revelou diferenças significativas, sobretudo na fadiga, onde o PCR do FAARFIELD foi até 2,8 vezes superior. Na deformação permanente, a discrepância foi menor, situando-se em torno do dobro. Conclui-se que não existe correlação direta entre os métodos, embora se observe alguma proporcionalidade na deformação permanente.

De forma global, este estudo evidenciou: (1) a relevância estratégica da monitorização contínua dos pavimentos aeroportuários; (2) a influência combinada do porte e da frequência das aeronaves no dimensionamento da infraestrutura; (3) a utilidade prática, mas também as limitações do FAARFIELD enquanto ferramenta de apoio à decisão; e (4) a importância de conjugar diferentes métodos de cálculo (computacionais e analíticos) para uma avaliação robusta.

Pode concluir-se que a metodologia aplicada forneceu resultados capazes de apoiar decisões de manutenção e reabilitação, assegurando a capacidade estrutural da pista perante o tráfego atual e futuro.

MONITORIZAÇÃO REMOTA EM AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS

4.1 Enquadramento

Os métodos de monitorização remota têm vindo a afirmar-se como ferramentas avançadas de apoio à avaliação estrutural de pavimentos, permitindo complementar as técnicas tradicionais com informação de elevada resolução espacial e temporal.

No presente estudo, foram utilizados os métodos disponíveis no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), que detém os recursos e a experiência necessários para a sua implementação. Apesar do interesse inicial em aplicar os métodos de monitorização remota a pavimentos aeroportuários, tal não foi possível, apesar de várias tentativas, pelo que os ensaios foram conduzidos em pavimentos rodoviários.

4.2 Interferometria por Radar de Abertura Sintética (InSAR)

4.2.1 Deteção de movimentos verticais com InSAR

A InSAR é uma técnica de monitorização remota baseada em radar que permite medir deslocamentos na superfície terrestre através de sensores transportados em plataformas móveis. Essas plataformas podem ser satélites, drones, carris instalados em terra, entre outros. No presente estudo, foram utilizados dados de satélite. O método consiste na análise da diferença de fase entre imagens de radar de abertura sintética (synthetic aperture radar, SAR) adquiridas em momentos distintos sobre a mesma área, permitindo detetar variações milimétricas na distância entre o sensor e o alvo ao longo da linha de vista (*Line-of-Sight*, LOS) (Crosetto et al., 2016). Quando aplicada a superfícies pavimentadas, como estradas, a técnica permite identificar padrões de assentamento ou levantamento através da análise de séries

temporais de deslocamento, com a exceção de aplicação a superfícies demasiadamente lisas que possam refletir o sinal SAR para fora do alcance do sensor (Crosetto et al., 2016). Entre as técnicas avançadas de InSAR destaca-se a *Persistent Scatterer Interferometry* (PSI) que será abordada na secção 4.2.3.

4.2.2 Princípios físicos da interferometria SAR

A interferometria SAR baseia-se na utilização da fase complexa das imagens SAR adquiridas por satélite, a qual resulta do tempo de ida e volta do sinal entre o sensor e a superfície terrestre, medido com elevada sensibilidade. Essa fase, apesar de ser influenciada por múltiplos fatores, é principalmente determinada pela distância geométrica entre o sensor e o alvo, que, quando varia entre duas aquisições, pode ser interpretada como deslocamento (Crosetto et al., 2016).

O processamento interferométrico começa pela formação de um par interferométrico, isto é, duas imagens SAR adquiridas em momentos diferentes e com pequena separação espacial (*baseline*), permitindo gerar um interferograma que representa a diferença de fase ponto a ponto. Esta fase interferométrica total contém não apenas a componente de deslocamento, mas também a contribuição da topografia, dos erros orbitais, dos efeitos atmosféricos e do ruído (Crosetto et al., 2016). Para extrair a componente útil, — ou seja, o deslocamento — é necessário modelar ou mitigar todas as restantes.

A fase medida em cada pixel do radar é naturalmente ambígua, pois está confinada ao intervalo $[-\pi, \pi]$, implicando a necessidade de resolver a ambiguidade de fase através de algoritmos de *unwrapping*. Esta operação visa reconstruir a variação contínua da fase real, assumindo coerência espacial ou temporal entre os pontos (Crosetto et al., 2016). Tal processo é particularmente sensível ao ruído e exige uma densidade mínima de pontos estáveis no terreno.

Outro aspeto físico central do InSAR é a sua sensibilidade unidirecional: a deformação é projetada na linha de vista do radar (LOS), o que significa que apenas deslocamentos com componente nessa direção são detetáveis (Crosetto et al., 2016). Assim, o InSAR não mede diretamente deslocamentos verticais ou horizontais, mas sim a sua projeção ao longo da LOS, que varia consoante a geometria da aquisição (ascendente ou descendente). A estimativa de componentes verticais e horizontais requer a combinação de diferentes geometrias ou a integração com outros sensores, como GNSS (Crosetto et al., 2016).

Finalmente, a medição eficaz de deslocamentos com InSAR depende da existência de pontos naturais no terreno, pontos cuja resposta radar é estável ao longo do tempo e das aquisições, sendo a sua seleção e caracterização uma etapa crítica do processamento, sobretudo em ambientes não urbanos, onde a presença de vegetação, relevo acentuado ou alterações superficiais pode comprometer a coerência interferométrica (Crosetto et al., 2016).

4.2.3 Técnicas de *Persistent Scatterer Interferometry* (PSI)

A técnica PSI surgiu como uma evolução da interferometria diferencial SAR convencional (DInSAR), com o objetivo de superar limitações associadas à coerência temporal e espacial em ambientes urbanos e não urbanos. Ao contrário da DInSAR clássica, a PSI baseia-se no tratamento de séries temporais longas de imagens interferométricas, possibilitando a detecção e monitorização de deformações lentas da superfície terrestre com precisão milimétrica e estabilidade temporal (Crosetto et al., 2016).

O princípio fundamental da PSI consiste na identificação de alvos pontuais cuja resposta radar se mantém estável ao longo do tempo, os denominados dispersores persistentes (PS). Estes pontos, muitas vezes localizados em elementos construídos como cantos de edifícios, postes metálicos, bordas de estrada ou outras estruturas refletoras, apresentam alta coerência interferométrica ao longo de dezenas de aquisições (Crosetto et al., 2016). A coerência elevada permite isolar com fiabilidade a componente de fase associada ao deslocamento, ao longo de intervalos temporais de meses a anos.

Durante o processamento PSI, a fase interferométrica observada é decomposta em várias componentes, nomeadamente: a componente de deslocamento, a fase topográfica residual (devida a imperfeições no modelo digital de terreno), os efeitos atmosféricos diferenciais, os erros orbitais residuais e o ruído. A principal vantagem da PSI reside na sua capacidade de separar estas componentes através de modelação espacial e temporal, permitindo extrair o deslocamento (Crosetto et al., 2016).

A técnica PSI não depende de modelos atmosféricos externos, uma vez que o efeito atmosférico é estimado diretamente a partir das séries temporais, assumindo-se que o deslocamento é modelável com comportamentos lentos e suaves ao longo do tempo. A separação entre o deslocamento e atmosfera baseia-se precisamente nestas diferenças de variação temporal: o deslocamento é assumido como lento e contínuo, enquanto os efeitos

atmosféricos são aleatórios no tempo mas espacialmente correlacionados (Crosetto et al., 2016).

Quanto à seleção dos dispersores persistentes, diversos algoritmos foram desenvolvidos com base na análise estatística da dispersão da fase ao longo da série temporal. Técnicas como o PSInSARTM, o StaMPS, o SqueeSARTM e outras variantes utilizam diferentes abordagens para identificar os pontos mais coerentes, ajustar os modelos e estimar os parâmetros de deslocamento e altitude com elevada fiabilidade (Crosetto et al., 2016). Recentemente, algoritmos como o StaMPS passaram a incorporar também dispersores distribuídos (distributed scatterers, DS), alvos com coerência ligeiramente inferior mas útil para aumentar a densidade espacial dos resultados, sobretudo em ambientes rurais ou naturais (Crosetto et al., 2016). A qualidade dos produtos PSI depende da frequência do radar (banda C, X ou L), da resolução espacial dos sensores, do número de imagens utilizadas, da densidade de dispersores persistentes e da correção eficaz dos efeitos atmosféricos e orbitais. Assim, a técnica PSI não só oferece resultados altamente precisos, como também permite uma caracterização espaço-temporal detalhada de processos de subsidência, levantamento, deslizamento ou deformação diferencial em áreas urbanas e lineares, como estradas e vias férreas (Crosetto et al., 2016).

No contexto operacional europeu, a PSI é a base do serviço EGMS, o qual utiliza algoritmos standard baseados em PSI para processar dados Sentinel-1 com coerência elevada e fornecer produtos harmonizados à escala continental (Crosetto et al., 2024).

4.2.4 Vantagens e limitações

Apesar do seu elevado potencial, a técnica InSAR apresenta várias limitações técnicas e operacionais. Uma das principais limitações das abordagens clássicas baseadas em pares de imagens (DInSAR) é a perda de coerência, frequentemente observada em áreas cobertas por vegetação, com forte relevo ou com alterações na superfície entre aquisições. A coerência é fortemente influenciada pela vegetação, pela topografia, pelo intervalo de tempo entre imagens e pelas mudanças nas propriedades de retrodispersão dos alvos (Crosetto et al., 2016). Os efeitos atmosféricos representam outro desafio significativo, uma vez que introduzem variações na fase interferométrica que são espacialmente correlacionadas, mas aleatórias no tempo, dificultando a distinção face ao sinal de deslocamento. No caso do DInSAR, o efeito atmosférico não é removido, resultando numa incerteza de deslocamento de ordem centimétrica.

Erros na órbita dos satélites geram rampas de fase nos interferogramas, que podem ser parcialmente corrigidas com modelos polinomiais, mas cujos resíduos podem ainda afetar a fiabilidade das medições (Crosetto et al., 2016). Estes erros têm impacto sobretudo em áreas extensas e pouco estruturadas, onde a modelação espacial é menos robusta.

A densidade de pontos medidos depende da existência de dispersores coerentes. Em ambientes não urbanos, a quantidade de alvos persistentes é frequentemente baixa, o que reduz a resolução espacial dos produtos e limita a sua aplicabilidade em zonas rurais ou naturais (Crosetto et al., 2016). Finalmente, o InSAR é intrinsecamente sensível apenas à componente de deformação projetada ao longo da LOS do satélite. Não é possível, com uma única geometria de aquisição, distinguir entre movimentos verticais e horizontais, sendo necessário combinar dados de passagens ascendentes e descendentes, ou integrar medições obtidas com sensores GNSS (Crosetto et al., 2016).

No contexto operacional europeu, o serviço EGMS apresenta uma limitação importante relacionada com a atualização dos seus produtos, que ocorre com frequência anual. Essa periodicidade implica um intervalo de atraso entre 8 e 20 meses entre a data da última aquisição considerada e a disponibilização dos resultados ao público (Crosetto et al., 2024).

4.3 *Light Detection and Ranging (LiDAR)*

4.3.1 Funcionamento da tecnologia LiDAR

O LiDAR é uma tecnologia de varrimento laser usada em monitorização, modelação e levantamento de infraestruturas rodoviárias. Esta tecnologia é capaz de recolher representações tridimensionais do ambiente com elevada densidade de informação, constituindo-se como uma solução eficiente e segura no apoio à gestão e manutenção de redes de transporte (Soilán et al., 2019)

O princípio de funcionamento do LiDAR baseia-se na emissão de feixes de laser que incidem sobre objetos e retornam ao sensor. A distância entre o emissor e o alvo é calculada através de duas técnicas principais: tempo de voo (*Time-of-Flight* – ToF) ou diferença de fase (*Continuous Wave* – CW). No primeiro caso, mede-se o tempo que o pulso leva a percorrer o trajeto de ida e volta; no segundo, analisa-se a diferença de fase entre a onda emitida e a recebida (Soilán et al., 2019). O resultado é uma nuvem de pontos 3D, que representa com grande detalhe a geometria do espaço envolvente.

Além da informação geométrica, alguns sistemas registam também a intensidade da luz retrodispersada, o que possibilita identificar propriedades superficiais dos objetos, como refletância e rugosidade (Soilán et al., 2019).

4.3.2 Componentes dos sistemas LiDAR

Um sistema LiDAR integra diferentes elementos para garantir a correta aquisição e georreferenciação dos dados. É possível combinar o sensor laser com sistemas de posicionamento e navegação, como Global Navigation Satellite System (GNSS) e Inertial Navigation System (INS), de modo a localizar cada ponto num sistema de coordenadas global (Soilán et al., 2019). Estes componentes permitem alinhar e referenciar a nuvem de pontos obtida com elevada precisão.

4.3.3 Tipos de sistemas LiDAR

Existem três principais configurações de sistemas LiDAR:

- *Terrestrial Laser Scanning* (TLS): sistemas estacionários, montados em tripés, que produzem levantamentos de alta resolução em curtas áreas. Esta configuração foi utilizada no caso de estudo.
- *Aerial Laser Scanning* (ALS): instalados em aeronaves, permitem a modelação de grandes áreas, como terrenos ou cidades.
- *Mobile Laser Scanning* (MLS): montados em veículos, constituem uma solução adequada para estradas e linhas férreas, permitindo a recolha contínua de dados em movimento (Soilán et al., 2019).

A escolha do tipo de sistema deve estar sempre alinhada com os objetivos do projeto e com a escala pretendida, sendo que o TLS é mais indicado para levantamentos de detalhe (troço específico), enquanto os MLS se destacam em aplicações de grande extensão linear, como redes rodoviárias (Tarsha Kurdi et al., 2023).

No caso de estudo desenvolvido, foi utilizado um sistema estacionário, TLS (Figura 4.1) para a aquisição de dados. No levantamento realizado, foram utilizados alvos de referência, constituídos por um painel elevado dividido em duas partes brancas e duas partes pretas, que serviram para garantir a correta georreferenciação da nuvem de pontos (Figura 4.2).



Figura 4.1 - Sensor LiDAR utilizado no levantamento em estrada



Figura 4.2 - Alvo de referência com duas partes brancas e duas partes pretas, utilizado para georreferenciação.

4.3.4 Vantagens e Limitações

Uma das mais relevantes vantagens do LiDAR é a sua capacidade de gerar nuvens de pontos densas, tendo esses pontos elevada precisão geométrica, permitindo obter uma caracterização detalhada de superfícies e estruturas (Muralikrishnan, 2021). Esta tecnologia possibilita, ainda, a documentação de formas complexas de modo rápido e sem contacto físico, o que a torna especialmente útil em ambientes de difícil acesso ou inseguros, onde os métodos tradicionais de levantamento apresentam limitações. A sua versatilidade é igualmente reconhecida, com aplicações comprovadas em topografia, engenharia civil, arquitetura,

conservação do património cultural e monitorização de deformações estruturais (ver revisão Muralikrishnan, 2021).

Entre as diferentes modalidades existentes, o LiDAR estacionário (TLS) apresenta vantagens específicas, nomeadamente a precisão do posicionamento tridimensional, melhor que a das restantes configurações, com valores de apenas alguns milímetros.

Apesar das suas vantagens, o LiDAR apresenta limitações técnicas e operacionais que condicionam a sua aplicação. A qualidade das medições é influenciada pelas propriedades das superfícies, incluindo cor, textura, refletividade e ângulo de incidência, fatores que podem comprometer a fiabilidade das medições em objetos muito brilhantes ou escuros (Muralikrishnan, 2021). Para além disso, os equipamentos estão sujeitos a erros sistemáticos de natureza mecânica e ótica e exigem procedimentos de calibração (ver Muralikrishnan, 2021). O processamento das nuvens de pontos, que podem conter milhões de registos, exige capacidade computacional significativa, aumentando a complexidade da análise e podendo introduzir erros (ver Muralikrishnan, 2021). Para além destas limitações, o custo elevado dos equipamentos constitui uma barreira à sua adoção generalizada (Lichti et al., 2012).

Em síntese, o LiDAR constitui uma tecnologia de grande potencial pela sua elevada precisão, densidade de dados e versatilidade de aplicação. Todavia, apresenta constrangimentos associados às propriedades superficiais dos alvos, à necessidade de calibração rigorosa, ao custo elevado e às exigências computacionais (Chow et al., 2013; Muralikrishnan, 2021). O TLS, modalidade utilizada no caso de estudo apresentado no capítulo 5, evidencia de forma clara tanto os benefícios como as limitações desta tecnologia (Chow et al., 2013).

4.3.5 Aplicações em infraestruturas de transporte

A aplicação do LiDAR em estradas tem-se revelado fundamental na monitorização do estado do pavimento e deteção de defeitos. Estradas mal mantidas conduzem a condições de operação perigosas, maior consumo de combustível, desgaste mecânico e aumento da sinistralidade (Bhatt et al., 2022). A utilização de scanners terrestres e móveis possibilita a deteção de irregularidades, fissuras, deformações ou buracos, permitindo às entidades responsáveis agir de forma preventiva.

No caso específico do levantamento realizado, o processo consistiu em colocar o sensor LiDAR e o alvo em pontos estratégicos ao longo da estrada. Em cada ponto, o equipamento

permanecia ativo durante alguns minutos para garantir a densidade necessária de pontos, avançando-se depois para a posição seguinte (Figura 4.3).



Figura 4.3 - Disposição do sensor LiDAR e do alvo na estrada durante o processo de aquisição de dados

A precisão do TLS pode atingir até 4 mm em medições diretas, o que abre espaço para aplicações de elevada exigência em engenharia civil, como monitorização de deformações rodoviárias, modelação digital de superfícies e avaliação de volumes (Tarsha Kurdi et al., 2023). A nível de gestão de ativos rodoviários, os sistemas MLS oferecem um processo de aquisição de dados mais rápido, seguro e eficiente, possibilitando a criação de inventários rodoviários detalhados, essenciais para a manutenção preventiva (Soilán et al., 2019), mas com precisão centimétrica.

4.4 Levantamento com Drones para Inspeção de Estradas (UAV)

4.4.1 Enquadramento

A monitorização das condições do pavimento rodoviário é fundamental para garantir a segurança e a eficiência da circulação. Tradicionalmente, os métodos baseavam-se em inspeções visuais ou veículos equipados com câmaras e lasers, que embora úteis, apresentavam limitações de custo, tempo, precisão e subjetividade (Barrile et al., 2020; Roberts et al., 2020). Os UAV e, especificamente os drones (Figura 4.4), surgem como uma solução eficaz para captar imagens de alta resolução de forma rápida e segura, reduzindo significativamente os custos operacionais (Barrile et al., 2020).



Figura 4.4 - Drone utilizado no caso de estudo

4.4.2 Planeamento do Voo

O primeiro passo do levantamento consiste na definição do plano de voo. São estabelecidos parâmetros como a altura de voo, a *Ground Sampling Distance* (GSD), a percentagem de sobreposição das imagens e a rota por *waypoints* (Barrile et al., 2020). O GSD é essencial, pois determina a resolução final do modelo gerado, ou seja, a dimensão do menor elemento identificável na imagem (Roberts et al., 2020). Para garantir consistência na recolha de dados, a câmara é configurada com ângulo adequado e são assegurados níveis elevados de sobreposição entre imagens consecutivas (Roberts et al., 2020).

4.4.3 Aquisição de Imagens

Idealmente, as imagens são captadas em missões automáticas previamente planeadas, garantindo regularidade e consistência dos dados recolhidos (Barrile et al., 2020). Caso não se verifiquem condições de segurança adequadas para a realização de voos automáticos, estes podem ser realizados em modo manual, com o movimento do UAV a ser controlado pelo operador. O UAV mantém altura constante e capta fotografias de alta resolução (Figura 4.5) em pouco tempo, preferencialmente em formato RAW para otimizar a qualidade da análise posterior (Roberts et al., 2020). As condições ambientais desempenham um papel determinante, devendo os levantamentos ocorrer em períodos de pouco tráfego, ausência de vento forte e boa luminosidade (Roberts et al., 2020).

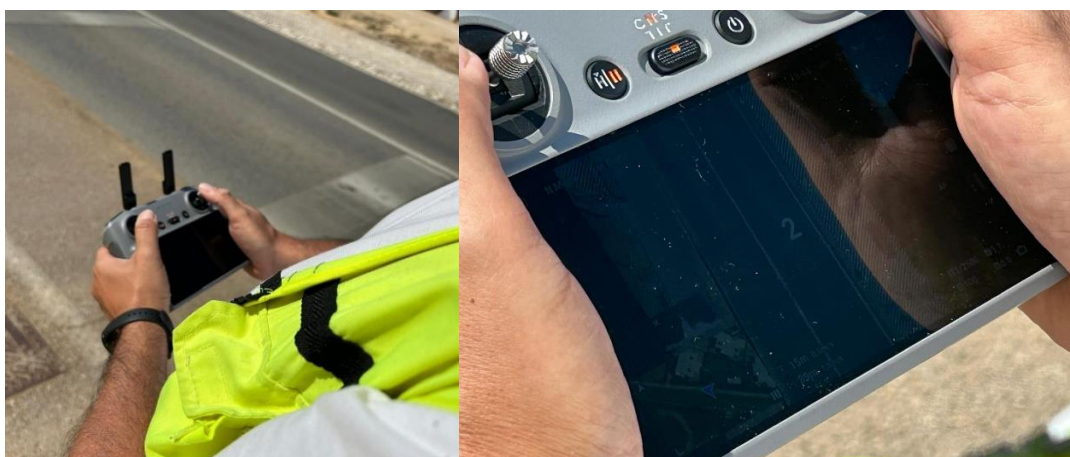


Figura 4.5 - Comando remoto do drone com ecrã que mostra a estrada em tempo real

4.4.4 Processamento e Análise dos Dados

Após a aquisição, as imagens passam por etapas de processamento e análise. Podem ser aplicados algoritmos de pré-processamento como Sobel e Prewitt, técnicas de segmentação e classificadores como *Support Vector Machines* (SVM) para deteção de fissuras longitudinais, transversais e do tipo pele de crocodilo (Barrile et al., 2020). Outra abordagem consiste na utilização da técnica de *Structure-from-Motion* (SfM) para gerar modelos tridimensionais do pavimento a partir de imagens bidimensionais, com segmentação posterior através de algoritmos como o *Random Sample Consensus* (RANSAC), permitindo medir deformações, buracos e *rutting* (Roberts et al., 2020). Os resultados podem ser integrados em softwares

especializados como Agisoft Metashape e CloudCompare para análise detalhada (Roberts et al., 2020).

4.4.5 Vantagens e Limitações

O uso de drones apresenta diversas vantagens: rapidez de execução, custos reduzidos, maior segurança para os operadores e obtenção de dados com elevada precisão espacial (Barrile et al., 2020; Roberts et al., 2020). Além disso, a integração em plataformas WebGIS possibilita a atualização contínua das bases de dados de gestão rodoviária (Barrile et al., 2020). Contudo, existem limitações como a autonomia reduzida da bateria (cerca de 30 minutos), restrições legais de voo, influência de condições meteorológicas e a necessidade de planeamento em zonas com baixo tráfego (Roberts et al., 2020).

MONITORIZAÇÃO REMOTA. CASO DE ESTUDO

5.1 Avaliação tradicional de pavimentos e técnicas remotas

A avaliação e monitorização da condição dos pavimentos rodoviários constituem um elemento central na gestão de infraestruturas de transporte. O envelhecimento natural dos materiais, a intensidade do tráfego e as condições ambientais são fatores que aceleram o processo de degradação, originando diversas imperfeições na superfície e na estrutura das estradas. A ausência de intervenções atempadas pode comprometer o conforto e a segurança dos utilizadores, aumentar os custos de manutenção e reduzir significativamente a vida útil da infraestrutura.

Tradicionalmente, a avaliação do estado dos pavimentos tem recorrido a métodos de inspeção visual ou a técnicas de ensaio destrutivas, semi-destrutivas e não destrutivas, com risco para os técnicos, bastante morosas e impondo restrições na circulação dos utentes. Estas técnicas apresentam limitações ao nível da representatividade, da segurança e da viabilidade económica.

Nas últimas décadas, a evolução tecnológica tem permitido o desenvolvimento e aplicação de técnicas avançadas de monitorização remota, que recolhem informação detalhada com maior rapidez, precisão e cobertura espacial. Entre estas técnicas destacam-se:

- (1) InSAR – monitorização remota de deslocamentos diferenciais do terreno ou de estruturas, permitindo identificar zonas com potenciais assentamentos;
- (2) UAV (drones) – aquisição de imagens de alta resolução para geração de ortofotomapas e deteção visual de anomalias superficiais;
- (3) LiDAR – modelos digitais de superfície e perfis longitudinais e transversais da via, úteis para avaliar a regularidade geométrica;
- (4) Georadar – caracterização não destrutiva da estrutura interna do pavimento, analisando profundidade e continuidade das camadas.

Este caso de estudo pretende demonstrar as potencialidades e limitações de uma abordagem multi-tecnológica, baseada na combinação de InSAR, UAV, LiDAR e GeoRadar, aplicada à avaliação de um pavimento em serviço. A integração dos resultados destas técnicas permitirá validar a sua eficácia individual e analisar de que forma a complementaridade entre elas pode fundamentar diagnósticos mais robustos e estratégias de manutenção mais eficientes.

5.2 Troço experimental para aplicação de tecnologias remotas

No âmbito deste trabalho, foi selecionado um troço rodoviário numa estrada secundária para a realização de ensaios experimentais. O troço faz parte de um percurso de um autocarro (ver Figura 5.1) que será instrumentado no âmbito de um projeto de investigação europeu em curso (“Connected and Adaptive Maintenance for Safer Urban and Secondary Roads” - CAMBER). O Projeto CAMBER surge no contexto da necessidade de integrar estas tecnologias em abordagens de gestão de ativos modernas e eficazes. O projeto tem como objetivo demonstrar a aplicabilidade e complementaridade das metodologias em cenários reais, potenciando a transição para uma gestão preditiva da rede viária (<https://camber-project.eu/>).

Para estudar as potencialidades das tecnologias remotas na gestão de ativos rodoviários, foram analisadas as técnicas enumeradas anteriormente. Assim, começou-se naturalmente por utilizar a informação, a nível de rede, fornecida pelos satélites (InSAR), que permitem detetar zonas com possíveis assentamentos sistemáticos, ao longo do tempo, na rede rodoviária. Após analisar o percurso do autocarro, foi escolhida uma secção de estrada para aplicação das restantes técnicas remotas, estudando a sua aplicabilidade e adequação em detetar as causas dos assentamentos. Dentro das zonas identificadas com assentamentos através do InSAR, foi em primeiro lugar confirmada a localização dos pontos com assentamentos, por forma a serem localizados na zona do pavimento, e não lateralmente à estrada. Dentro destas zonas, foi escolhida a mais adequada para aplicação das restantes técnicas (ex.: ausência de vegetação, facilidade na obtenção de autorizações para levantamento de UAV).

A escolha deste troço justifica-se pela interpretação preliminar dos resultados do InSAR, onde foram identificados pontos com velocidades negativas, correspondentes a potenciais assentamentos, que estão representados a amarelo e vermelho (Figura 5.1). Esta condição, aliada ao facto de se tratar de uma secção de estrada com boas condições para a

realização dos restantes ensaios de campo, tornou-a particularmente adequada para a realização do caso de estudo.



Figura 5.1 - Velocidades, em milímetros por ano, obtidas a partir do InSAR no trajeto de autocarro e identificação do troço estudado

5.3 InSAR

Como já referido, no âmbito do caso de estudo, o InSAR foi utilizado como ferramenta preliminar para identificar zonas do pavimento da estrada secundária com possíveis assentamentos diferenciais (Figura 5.2). Esta etapa revelou-se essencial para a seleção da secção para aplicação das restantes técnicas. Neste estudo foram utilizados dados resultantes da combinação de observações de órbitas ascendentes e descendentes dos satélites. Deste modo, foram consideradas velocidades verticais e a análise não foi condicionada pelo facto das medições InSAR serem efetuadas ao longo da linha de vista.

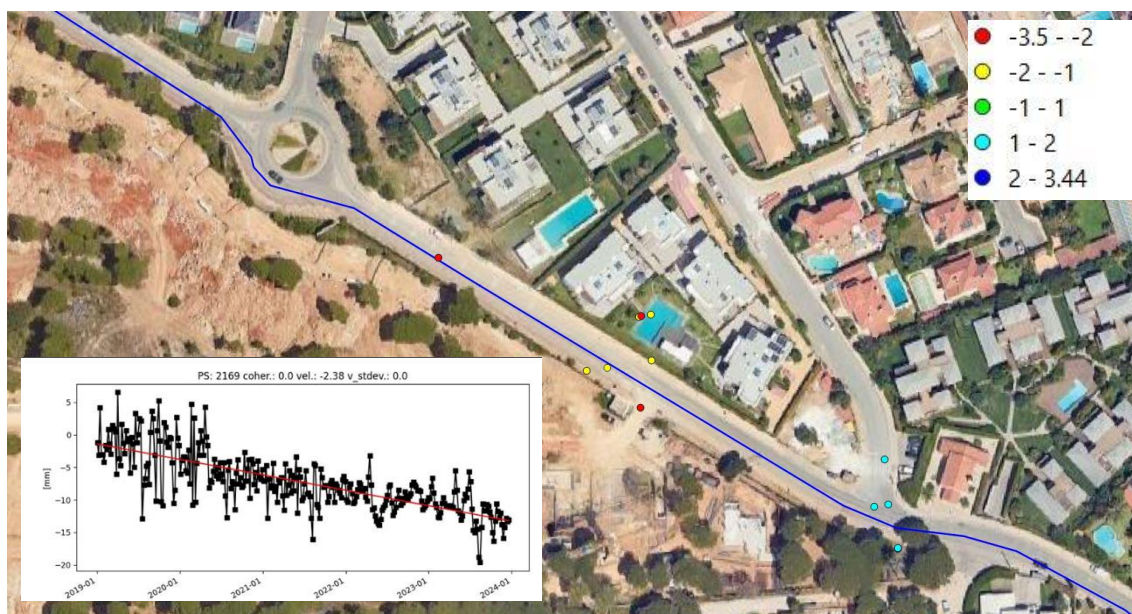


Figura 5.2 - Velocidades, em milímetros por ano, obtidas a partir do InSAR no troço em estudo, destacando zonas com potenciais assentamentos diferenciais e gráfico com a evolução entre 2019 e 2024.

Em termos de potencialidades, destacou-se a capacidade de deteção de deformações a larga escala sem necessidade de contacto direto com o pavimento, com custos relativamente reduzidos e aplicabilidade em cenários urbanos, como o presente.

Contudo, no contexto deste estudo, foi necessário considerar limitações já descritas na literatura (ver secção 4.2.4), relacionadas com a coerência em áreas vegetadas, os efeitos atmosféricos e a resolução espacial. Estas restrições condicionam a aplicabilidade em zonas específicas de estradas secundárias e municipais.

Apesar destas limitações, o InSAR revelou-se de grande utilidade estratégica, para aplicação ao nível da rede, fornecendo informação das principais zonas com potenciais problemas e consequentemente como ponto de partida para a integração com outras tecnologias (UAV, LiDAR e GPR), garantindo uma abordagem mais completa e robusta à avaliação do pavimento.

5.4 Drone (UAV)

A utilização de drones constituiu uma das ferramentas mais relevantes deste caso de estudo, permitindo a realização de levantamentos fotogramétricos de elevada resolução

espacial. Os voos efetuados, a 10 m e 15 m de altura, possibilitaram a criação de ortofotomapas com resoluções de 3,4 mm e 5 mm (Figura 5.3), permitindo identificar com clareza patologias superficiais como pele de crocodilo (Figura 5.4 A), diferenças de textura (Figura 5.4 B) e outras imperfeições da camada de desgaste.

Apesar da sua utilidade, a aplicação prática do drone enfrentou diversas limitações no contexto do troço estudado: (1) Restrições legais e operacionais, decorrentes da necessidade de autorizações para sobrevoar áreas urbanas ou zonas com circulação de pessoas, o que reduziu o perímetro de análise; (2) Obstáculos físicos (ex.: copas de árvores), que dificultaram a cobertura total do troço em estudo; e (c) Condições de voo influenciadas pela altura escolhida, sendo que alturas mais baixas (10 m) proporcionaram maior resolução.

Assim, apesar de não ter sido possível levantar a totalidade do percurso, os UAVs mostraram-se essenciais para a detecção e caracterização visual das anomalias superficiais, complementando os resultados de outras tecnologias. No entanto, para serem utilizadas de uma forma sistemática, requerem eventual detecção automática de defeitos, com base em ferramentas de processamento digital de imagem ou inteligência artificial (IA).

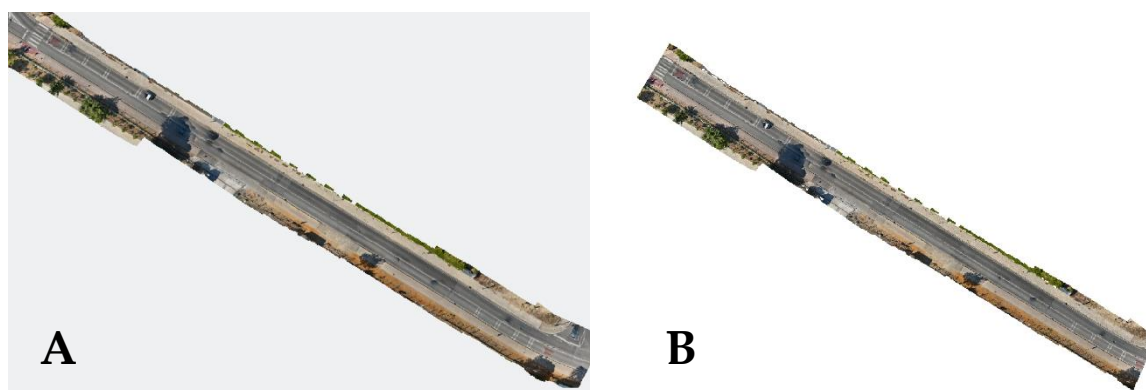


Figura 5.3 - Ortofotomosaicos da secção estudada gerados com recurso a UAV com resoluções de (A) 3,4 mm e (B) 5 mm.

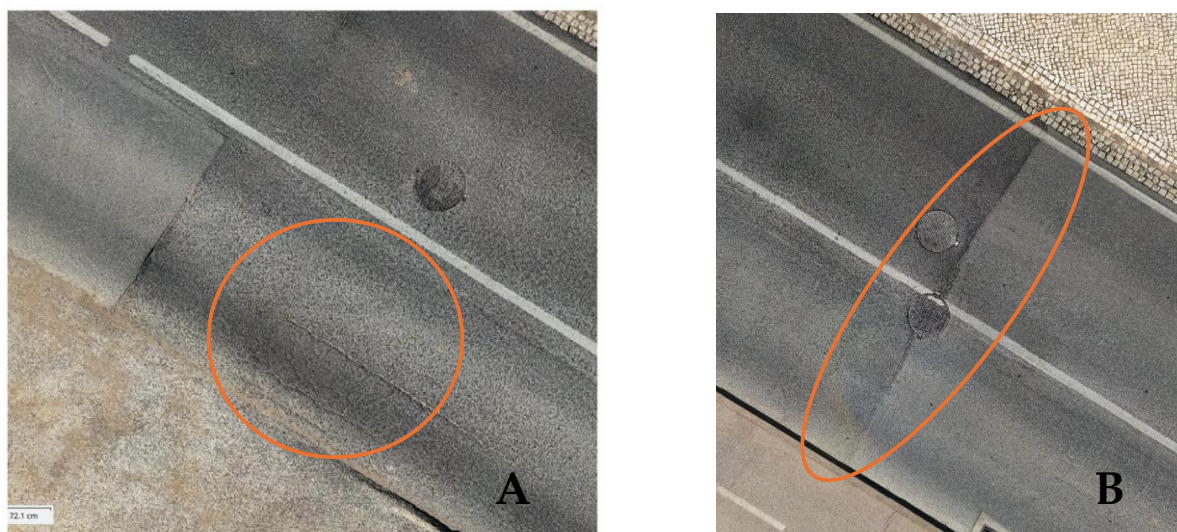


Figura 5.4 - Exemplos de anomalias superficiais detetadas por UAV: (A) fendilhamento em pele de crocodilo e (B) delimitação da zona de reparação, com texturas distintas.

5.5 LiDAR

O levantamento por LiDAR terrestre (Figura 5.5 e Figura 5.6) foi fundamental para a caracterização do nivelamento longitudinal e transversal do troço estudado, fornecendo um modelo digital de superfície com resolução de 5 cm (Figura 5.7 e 5.8). Os píxeis azuis apresentados na Figura 5.8 correspondem a zonas horizontais e os píxeis coloridos mostram a variabilidade da orientação da superfície e correspondem às zonas mais irregulares do pavimento. A partir da nuvem de pontos foi possível extrair perfis longitudinais e transversais (Figura 5.9), permitindo avaliar a regularidade da via e detetar eventuais deformações globais.

As potencialidades do LiDAR destacam-se pela: (1) Elevada precisão geométrica, essencial para análises detalhadas; (2) Capacidade de cobertura de áreas relativamente extensas com rapidez; e (3) Possibilidade de integração com outras tecnologias (fotogrametria e GPR), potenciando uma análise multidimensional.

Todavia, durante este estudo, registaram-se as seguintes limitações: (1) A técnica é sensível à presença de obstáculos e sombras (ex.: veículos estacionados ou vegetação), que podem originar zonas sem informação; (2) O processamento da nuvem de pontos exige recursos computacionais elevados e tratamento especializado; e (3) O levantamento é essencialmente superficial, não permitindo inferir diretamente sobre a estrutura interna do pavimento.

Apesar destas restrições, o LiDAR constituiu um contributo decisivo para a obtenção de informação geométrica precisa, fundamental para cruzar com os resultados do GPR e validar irregularidades superficiais identificadas pelo UAV.



Figura 5.5 - Secção completa LiDAR



Figura 5.6 - Secção estudada LIDAR

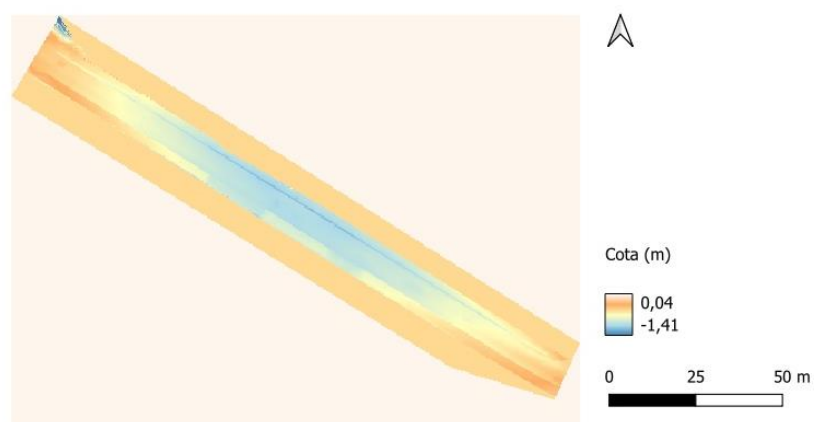


Figura 5.7 - Modelo digital de superfície (resolução 5 cm) obtido a partir da nuvem de pontos LiDAR.

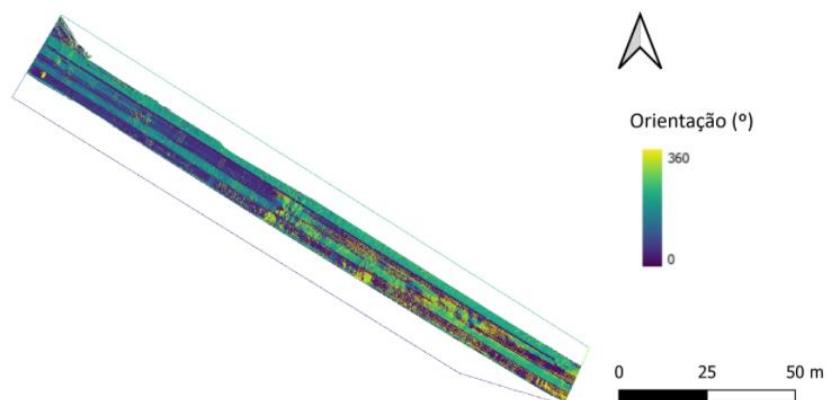


Figura 5.8 - Orientação de pixels obtida a partir do modelo digital de superfície LiDAR.

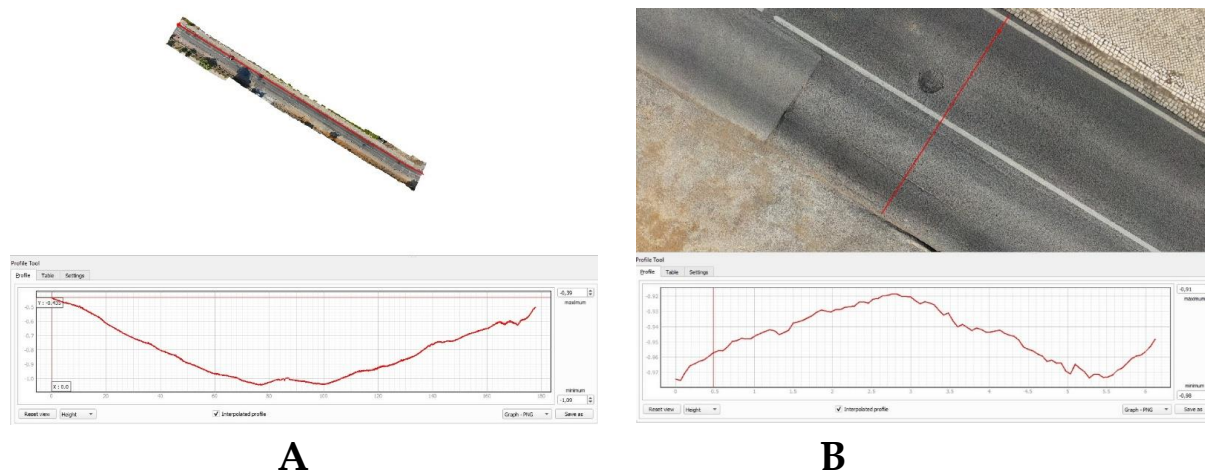


Figura 5.9 - Exemplo de levantamento obtido com LiDAR: (A) Perfil longitudinal na rodeira externa e (B) Perfil transversal da estrada na zona com fendilhamento em pele de crocodilo.

5.6 GeoRadar (*Ground Penetrating Radar*)

O GeoRadar revelou-se de extrema utilidade no estudo em profundidade das camadas do pavimento, permitindo identificar a sua espessura, continuidade e eventuais anomalias estruturais. No caso da secção em estudo, o GPR possibilitou a deteção de zonas com

assentamentos diferenciais, bem como a identificação de elementos enterrados que influenciam o desempenho estrutural (Figura 5.10).

Em termos de potencialidades, destacou-se a capacidade de: (1) Obter informação sobre as camadas do pavimento; (2) Identificar heterogeneidades estruturais que não seriam visíveis apenas pela inspeção superficial; e (3) Mapear de forma contínua todo o troço analisado.

No entanto, surgiram limitações técnicas que afetaram a qualidade dos resultados: (1) A necessidade de uma calibração adequada do equipamento para garantir resultados fiáveis em diferentes condições de pavimento; e (2) A falta de informação sobre a estrutura do pavimento e materiais para uma melhor calibração dos resultados e validação da velocidade de propagação da onda.

Apesar destes desafios, o GPR foi determinante para complementar os resultados obtidos pelas outras tecnologias, fornecendo uma visão mais profunda da estrutura e confirmando a presença de irregularidades que poderiam comprometer a durabilidade do pavimento.

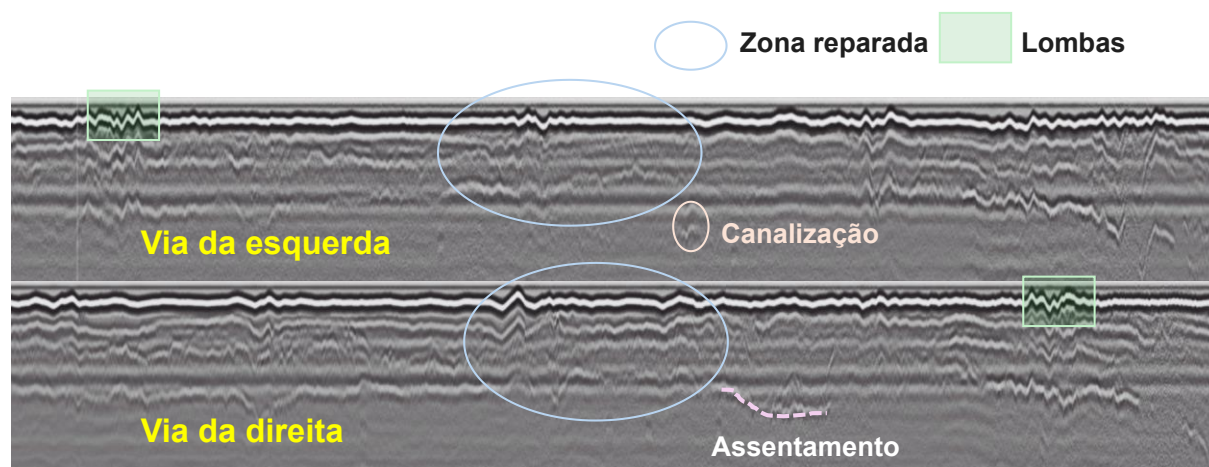


Figura 5.10 - Resultados do GeoRadar no troço estudado, ilustrando a avaliação da estrutura em profundidade.

5.7 Análise de uma anomalia localizada: fendilhamento em “pele de crocodilo”

5.7.1 Enquadramento e caracterização da anomalia

No troço analisado foi identificada uma anomalia superficial caracterizada por um padrão típico de pele de crocodilo, associado a um mecanismo de fadiga avançada das camadas betuminosas. Para caracterizar esta anomalia, procedeu-se à extração de perfis longitudinais e transversais a partir dos levantamentos realizados com LiDAR terrestre (TLS) e com UAV (fotogrametria). A extensão de cada perfil foi definida entre dois pontos, iniciando-se na marca representada pela bola vermelha e terminando na cruz branca (Figura 5.11), garantindo que o mesmo alinhamento da anomalia era analisado com ambas as tecnologias.



Figura 5.11 - Exemplo de perfil longitudinal

5.7.2 Resolução dos dados e comparabilidade entre LiDAR e UAV

A principal diferença entre os dois métodos de aquisição reside na resolução geométrica alcançada. O levantamento com drone apresentou uma resolução de aproximadamente 3,4 mm para um voo a 10 m de altura e de cerca de 5 mm para 15 m, o que se traduziu numa elevada densidade de pontos e numa representação muito detalhada da superfície. No caso do LiDAR, a nuvem de pontos teria resolução nativa

da ordem dos milímetros, contudo, para evitar lacunas e garantir uniformidade ao longo de toda a secção, a resolução foi degradada para cerca de 5 cm.

Apesar desta diferença na densidade de pontos, os perfis obtidos por ambos os métodos revelaram-se semelhantes, apresentando traçados praticamente idênticos quer nos alinhamentos longitudinais quer nos transversais (Figura 5.12). O drone, pela sua maior resolução, apresenta uma curva mais discretizada em detalhes e variações locais, enquanto o LiDAR produz um traçado mais suavizado, no entanto, a geometria global coincide, demonstrando de forma clara que ambos os levantamentos são comparáveis e coerentes na descrição da anomalia.

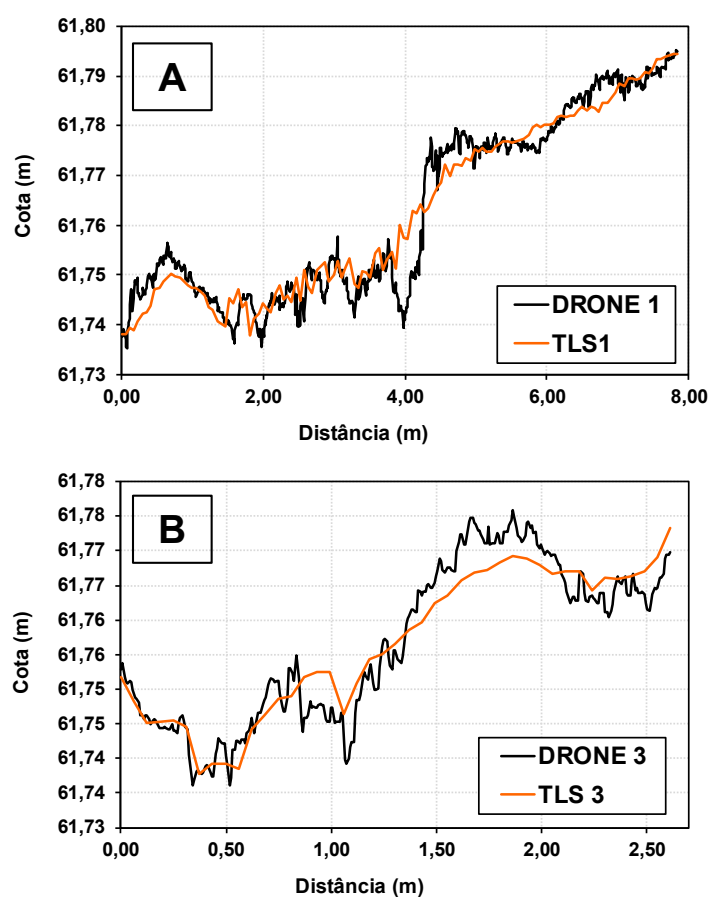


Figura 5.12 - A: Traçado do perfil longitudinal para o UAV e LiDAR;
e B: Traçado do perfil transversal para o UAV e LiDAR.

5.7.3 Análise do perfil longitudinal

Nos perfis longitudinais (Figura 5.13) obtidos pelas duas técnicas é particularmente evidente a existência de um assentamento localizado associado à degradação da pele de crocodilo, observando-se uma depressão nítida ao longo do alinhamento escolhido. Esta secção longitudinal passa diretamente sobre uma das fendas principais, o que origina um aumento natural do ruído geométrico nos dados, sobretudo no modelo obtido por drone devido à sua maior resolução. Ainda assim, mesmo com este maior detalhe e consequente variabilidade pontual, verifica-se que a tendência global do perfil é praticamente coincidente entre LiDAR e UAV, o que confirma que ambas as metodologias descrevem de forma consistente o abatimento associado à anomalia.

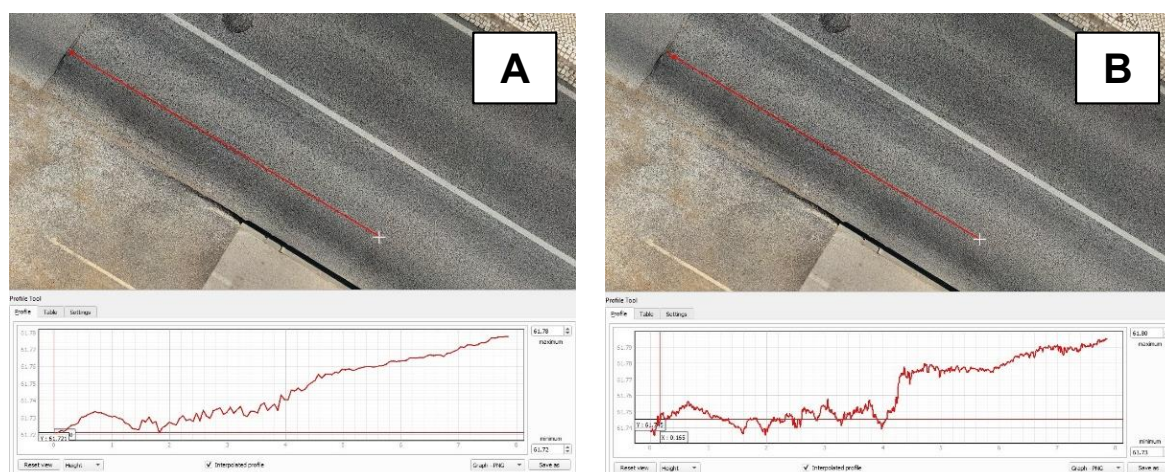


Figura 5.13 - Perfis longitudinais obtidos por LiDAR (A) e UAV (B)

5.7.4 Análise do perfil transversal

Os perfis transversais (Figura 5.14) obtidos pelas duas técnicas permitem observar com grande clareza as fendas que compõem o padrão de pele de crocodilo. A presença de fendas longitudinais na superfície é perfeitamente visível nas duas metodologias, embora o drone evidencie com maior nitidez a abertura das fissuras devido à sua resolução mais elevada. O LiDAR, mesmo apresentando uma descrição mais suavizada, reproduz corretamente a geometria geral das fendas e a sua posição

relativa, demonstrando novamente que os resultados obtidos por ambas as técnicas são comparáveis e igualmente válidos para a caracterização visual da anomalia.

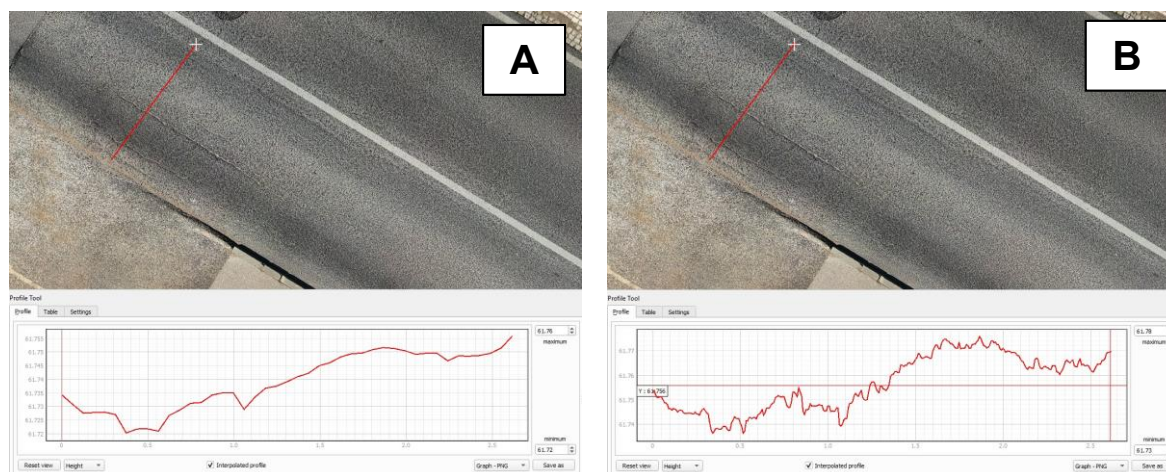


Figura 5.14 - Perfis transversais obtidos por LiDAR (A) e UAV (B)

5.7.5 Síntese

A análise integrada dos perfis longitudinais e transversais obtidos por LiDAR e UAV demonstra que ambos os métodos captam de forma consistente a geometria da anomalia e permitem caracterizar adequadamente o seu estado. A maior resolução espacial do modelo digital de superfície obtido através do drone traduz-se numa representação mais detalhada da superfície da pele de crocodilo e das respetivas fissuras. Os resultados revelam um assentamento longitudinal significativo, compatível com o mecanismo de fadiga associado à pele de crocodilo, e confirmam a presença de fendas longitudinais e transversais bem definidas, permitindo a caracterização da patologia e demonstrando a utilidade da integração de metodologias remotas de alta precisão na análise de pavimentos degradados.

5.8 Síntese comparativa das tecnologias aplicadas

A integração de InSAR, UAV, LiDAR e GPR demonstrou o carácter complementar destas tecnologias. O InSAR foi decisivo na fase inicial, ao indicar zonas com maior potencial de deslocamento. O UAV permitiu documentar com grande detalhe as patologias superficiais, embora com restrições operacionais. O LiDAR forneceu a caracterização geométrica do troço, essencial para avaliar a regularidade longitudinal e transversal. O GPR acrescentou a perspetiva estrutural, identificando imperfeições em profundidade e confirmando anomalias não visíveis à superfície.

Assim, as limitações individuais de cada técnica foram mitigadas pela abordagem conjunta, demonstrando que a utilização integrada destas metodologias potencia uma avaliação mais completa e robusta do pavimento.

6 CONCLUSÕES

A presente dissertação teve como objetivo avaliar o desempenho estrutural de pavimentos através da combinação de metodologias tradicionais de análise e de técnicas inovadoras de monitorização remota, procurando contribuir para uma abordagem mais integrada, rigorosa e adaptada às exigências atuais da gestão de infraestruturas de transporte. O trabalho centrou-se em dois casos de estudo distintos: (i) a análise estrutural de uma pista aeroportuária para dois períodos, separados por mais de duas décadas; e (ii) a aplicação experimental de tecnologias emergentes na avaliação de um troço rodoviário. Estes estudos foram desenhados de forma a se testarem e avaliarem técnicas complementares de análise estrutural de pavimentos.

Os resultados do primeiro caso de estudo, indicam que a caracterização estrutural de pavimentos aeroportuários continua a constituir um desafio de elevada complexidade, sobretudo pela variabilidade do tráfego aéreo, pelas condições construtivas e pela influência de intervenções sucessivas ao longo da vida útil da infraestrutura. A análise dos valores de PCN e PCR demonstrou discrepâncias relevantes entre os dados obtidos pelos dois métodos e os resultados obtidos por modelação, evidenciando a necessidade de avaliações independentes e regulares que garantam a representatividade real da capacidade estrutural da pista. Constatou-se, ainda, que aeronaves de grande porte e com muitos movimentos, como o Airbus A330-300, assumem um papel determinante na definição do dimensionamento, mas que aeronaves mais leves com maior frequência de movimentos, podem também contribuir de forma significativa para o desgaste acumulado. Do ponto de vista metodológico, o software FAARFIELD revelou-se uma ferramenta essencial e de utilização prática na avaliação estrutural do pavimento aeroportuário, embora com limitações importantes relacionadas com a dificuldade de representação das condições reais das camadas, com a necessidade de restringir a tipologia de aviões a um máximo pré-determinado, e com a ausência de fatores ambientais no cálculo. O recurso ao modo “User Defined” mostrou-se útil para aproximar os resultados da realidade, mas não elimina por completo as referidas simplificações do

programa. Já o modelo linear elástico BISAR permitiu compreender melhor o comportamento estrutural do pavimento, destacando a deformação permanente como critério de ruína mais crítico, e validou a importância de conjugar métodos distintos. No conjunto, verificou-se que a aplicação integrada de diferentes abordagens analíticas permite resultados mais robustos e aumenta a fiabilidade das decisões de manutenção e reforço.

O segundo caso de estudo confirmou o valor acrescentado da monitorização remota na monitorização de pavimentos, demonstrando que a integração de tecnologias como InSAR, UAV, LiDAR e GPR gera resultados mais completos do que a utilização isolada de cada técnica. O InSAR mostrou-se particularmente eficaz na identificação inicial de zonas suscetíveis a deslocamentos; o UAV destacou-se pela elevada resolução no registo de patologias superficiais, embora condicionado por restrições operacionais; o LiDAR contribuiu com informação geométrica precisa, essencial para avaliar irregularidades longitudinais e transversais; e o GPR revelou-se importante para compreender o estado estrutural em profundidade, identificando anomalias não visíveis à superfície. Assim, comprovou-se que a combinação destas metodologias permite superar limitações individuais e alcançar uma caracterização mais rigorosa e abrangente do desempenho dos pavimentos.

Apesar dos resultados alcançados, subsistem algumas limitações a considerar, para os métodos testados e análises efetuadas. No primeiro caso de estudo, a principal dificuldade decorreu da natureza e qualidade da informação disponível relativamente ao tráfego aéreo e ao histórico de intervenções. Em alguns momentos, foi necessário recorrer a simplificações e aproximações (nomeadamente na seleção de aeronaves equivalentes e na definição dos cenários de tráfego), o que pode introduzir margens de incerteza nos valores de PCR obtidos. Ainda assim, estas opções metodológicas foram fundamentadas e permitiram manter a consistência da análise. No segundo caso de estudo, embora a aplicação de InSAR, UAV, LiDAR e GPR tenha demonstrado grande potencial, cada tecnologia apresentou restrições operacionais e técnicas próprias, que limitam a sua aplicação isolada e evidenciam a necessidade de maior consolidação dos métodos de integração.

De forma global, esta dissertação evidenciou a relevância estratégica da monitorização contínua das infraestruturas em causa, a necessidade de se considerar a influência combinada do porte e da frequência de operação das aeronaves no dimensionamento dos pavimentos das pistas aeroportuárias, a utilidade prática, mas também as limitações, do FAARFIELD como ferramenta de apoio à decisão, e a mais-valia de recorrer a tecnologias de monitorização remota para enriquecer a caracterização estrutural e funcional dos pavimentos. A articulação

entre métodos tradicionais e inovadores revelou-se, assim, fundamental para alcançar uma avaliação mais precisa e representativa, capaz de sustentar decisões técnicas em contextos de elevada exigência operacional.

No futuro, destaca-se a importância de aprofundar a aplicação de metodologias conjuntas em contextos reais e diversificados, testando diferentes combinações de tráfego, materiais e configurações estruturais em pavimentos aeroportuários e rodoviários. Será igualmente relevante desenvolver protocolos mais consistentes para a utilização integrada de tecnologias de monitorização remota, de forma a reduzir incertezas e uniformizar critérios de interpretação. Por fim, reforça-se a utilidade de manter campanhas de monitorização sistemáticas, que permitam avaliar a evolução do desempenho dos pavimentos ao longo do tempo e validar os resultados obtidos por modelação e simulação.

Em síntese, a presente dissertação demonstrou que a combinação de abordagens tradicionais com tecnologias emergentes permite alcançar uma avaliação estrutural mais rigorosa e abrangente, fornecendo bases sólidas para decisões estratégicas de manutenção e reabilitação de infraestruturas críticas de transporte. Os resultados deste trabalho constituem um contributo relevante para a prática da engenharia civil, nomeadamente no que se refere à área dos pavimentos aeroportuários e rodoviários, reforçando a importância da inovação e da integração metodológica no apoio à gestão sustentável destas infraestruturas.

BIBLIOGRAFIA

Barrile, V., Bernardo, E., Fotia, A., Candela, G., Bilotta, G. (2020). Road Safety: Road Degradation Survey Through Images by UAV. WSEAS Transactions on Environment and Development. 16, 649-659. DOI: 10.37394/232015.2020.16.67

Bhatt, A., Bharadwaj, S., Sharma, V. B., Dubey, R., & Biswas, S. (2022). An overview of road health monitoring system for rigid pavement by terrestrial laser scanner. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLIII-B1-2022, 173–180. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2022-173-2022>

Brill, D. R. (2023a). FAARFIELD 2.1 Readme. FAA Airport Technology R&D Branch, ANG-E262

Brill, D.R. (2023b). PCN–PCR comparisons for large- and medium-hub airport runways. Report No. DOT/FAA/TC-23/57. Federal Aviation Administration. Disponível em: <https://www.airporttech.tc.faa.gov/Products/Airport-Pavement-Papers-Publications/>

Chou, Y.T. (1982). Structural Behaviour of Flexible Airfield Pavements – Proc. Bearing Capacity of Roads and Airfields, June 1982 – Trondheim.

Chow, J. C. K., Lichti, D. D., Glennie, C., & Hartzell, P. (2013). Improvements to and Comparison of Static Terrestrial LiDAR Self-Calibration Methods. Sensors, 13, 7224-7249. <https://doi.org/10.3390/s130607224>

Crosetto, M., Cuevas-González, M., Mróz, M., Moldestad, D. A., Raspini, F., Casagli, N., Bateson, L., Novellino, A., Motagh, M., Guerrieri, L., Comerci, V. (2024). European Ground Motion Service: a decade of Sentinel-1 observations. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=5190061> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5190061>

Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Devanthery, N., & Crippa, B. (2016). Per-sistent Scatterer Interferometry: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 115, 78–89. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011>

FAA (2011) Use of Nondestructive Testing in the Evaluation of Airport Pavements, Advisory Circular No.: 150/5370-11B, Federal Aviation Administration. Disponível em: https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/150_5370_11b.pdf

FAA (2021) Airport Pavement Design and Evaluation, Advisory Circular No: AC 150/5320-6G, Federal Aviation Administration. Disponível em: https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/150-5320-6G-Pavement-Design.pdf

FAA (2022) Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength – PCR, Advisory Circular No: AC 150/5335-5D, Federal Aviation Administration. Disponível em: https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/150-5335-5D-Pavement-Strength-202501.pdf

FAA (2023). FAARFIELD 2.1.1 – Standard software for airport pavement design and evaluation, Federal Aviation Administration. Available at: <https://www.airport-tech.tc.faa.gov/Products/Airport-Safety-Papers-Publications/Airport-Safety-Detail/Article/MID/3682/ArticleID/2841/FAARFIELD-20>

Fontul, S. (2004) Structural Evaluation of Flexible Pavements using Non-Destructive Tests. Tese de Doutoramento desenvolvida no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e apresentada para obtenção do grau de doutoramento da Universidade de Coimbra, Lisboa.

Fontul, S. (2023). Avaliação da Capacidade de Suporte de Pavimentos Aeroportuários – Classificação ACN/PCN. Sessão Técnica, EPIC SANA Luanda Hotel, 31 de maio de 2023.

ICAO (2022). A41-WP/269 – Pavement Asset: Optimisation of the Overall Lifecycle of Pavement for Mastering Aircraft Operations, Cost Efficiency and GHG Footprint. Assembly – 41st Session, Technical Commission, Agenda Item 33, 15 August 2022.

Lima, J. P. de O. M. (2024) Avaliação da Capacidade de Carga de Pavimentos Aeroportuários. Modelação e Digitalização em BIM. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa.

LNEC (2001). Avaliação da Capacidade de Carga da Pista 10-28 do Aeroporto de. Relatório 325100 – NPR, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

LNEC (2007). Classificação ACN/PCN dos Pavimentos do Aeródromo Municipal de Cascais. Relatório 407/2007 – NIRA, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Muralikrishnan, B. (2021) Performance evaluation of terrestrial laser scanners - a review, *Measurement Science and Technology*, 32, 072001. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/abdae3>

Roberts, R., Inzerillo, L., & Di Mino, G. (2020). Using UAV Based 3D Modelling to Provide Smart Monitoring of Road Pavement Conditions. *Information*, 11(12), 568. <https://doi.org/10.3390/info11120568>

Shell (1978). Shell Pavement Design Manual – Asphalt Pavements and Overlays for Roads Traffic – Shell International Petroleum Company, London, 1978.

Soilán, M., Sánchez-Rodríguez, A., del Río-Barral, P., Perez-Collazo, C., Arias, P., & Ri-veiro, B. (2019). Review of Laser Scanning Technologies and Their Applications for Road and Railway Infrastructure Monitoring. *Infrastructures*, 4(58), 1–29. DOI: <https://doi.org/10.3390/infrastructures4040058>

Tarsha Kurdi, F., Reed, P., Gharineiat, Z., & Awrangjeb, M. (2023). Efficiency of Terrestrial Laser Scanning in Survey Works: Assessment, Modelling, and Monitoring. *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*, 32(2), 556334. DOI: <https://doi.org/10.19080/IJESNR.2023.32.556334>



