

Pavimentos aeronáuticos em betão pré-esforçado:

**Reforço estrutural em *Stone Mastic Asphalt* aplicado à pista da Base Aérea
N.º 11 em Beja**

Miguel Ângelo Cardoso Madrinha

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em

Aeronáutica Militar

Especialidade de Engenharia de Aeródromos

Orientadores:

Professor Doutor Luís Guilherme de Picado Santos

Major Rui João Santos Campos e Ramos

Júri

Presidente: Coronel António Maria Afonso Marcos

Orientador: Professor Doutor Luís Guilherme de Picado Santos

Orientador: Major Rui João Santos Campos e Ramos

Vogal: Major Luís Filipe Magalhães Pereira

Vogal: Professor Doutor José Manuel Coelho das Neves

Março de 2019

Resumo

A evolução que, nos dias de hoje, se verifica no transporte de passageiros por meio aéreo obriga ao desenvolvimento de soluções que permitam o transporte de elevada quantidade de passageiros e de forma expedita. Estas soluções podem incidir sobre um incremento no número de movimentações de aeronaves ou de um aumento da capacidade de transporte de passageiros por aeronave. Esta dissertação incide no estudo de uma possibilidade de reforço do pavimento da pista da Base Aérea N.º 11, partilhada com o aeroporto de Beja, recorrendo a um material relativamente recente, o *Stone Mastic Asphalt* (SMA) de forma a suportar, pelo menos, as exigências estruturais da aeronave Airbus A380.

Esta dissertação faz uma caracterização geral dos pavimentos com principal incidência nos pavimentos com destino a estruturas aeroportuárias, assim como das metodologias de ensaio mais correntes para avaliação estrutural e funcional. Segue-se uma caracterização do pavimento da Base Aérea N.º 11, com o fim de se compreender o estado atual em que se encontra, fundamental para a justificação de uma proposta de dimensionamento de reforço.

Para o dimensionamento, foi necessário realizar um estudo do tráfego aéreo atual, civil e militar. Com este estudo elaborou-se uma previsão e proposta das alterações a que o tráfego civil poderá estar sujeito e que influenciam o dimensionamento do reforço estrutural. Recorrendo a ferramentas computacionais de dimensionamento, desenvolveu-se uma proposta para reforço estrutural levando em linha de conta o tráfego proposto e a possibilidade de operação do A380.

Pode dizer-se que se chegaram a valores com significado para a espessura de SMA, o que indica a necessidade de avaliar mais especificamente as soluções e eventualmente estudar alternativas que permitam uma maior relação custo-benefício.

Palavras-chave: pavimentos; pré-esforço; reabilitação estrutural; *Aircraft Classification Number*; *Pavement Classification Number*;

Abstract

The evolution that, nowadays, is possible to see in the passenger transportation by air leads to the development of solutions that allows hasty transport of a high number of passengers. These solutions should focus in an increasement of the number of movements of airplanes or in an increasement of the passenger plane capacity. This thesis focus in a study of a possibility to reinforce the pavement of the Air Base N.º 11, shared with Beja airport, using a recent asphalt material, Stone Mastic Asphalt in a way that can ensure the structural requirements for airplane Airbus A380-800.

This thesis is based on a general characterization of pavements with focus in airport pavements, as well as the test methodologies applied for structural and functional evaluation. With the objective of understanding the state of the pavement in study, it was made a more particular characterization of the air Base N.º 11 pavement, fundamental to justify the reinforcement design.

For the pavement reinforcement design was necessary to study the actual air traffic, civilian and military. By this study was possible to predict the increase of civilian traffic that influence the structural reinforcement design. Thus, using computational software, a structural reinforcement layer was designed.

The values obtained for the SMA thickness are significant, that indicates the need to assess the results and eventually the need to study alternatives that ensure better cost-beneficial relation.

Keywords: pavements, prestressed; Structural rehabilitation; Aircraft Classification Number; Pavement Classification Number;

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço ao Professor Doutor Luís de Picado Santos, meu orientador, pela disponibilidade demonstrada para orientação desta dissertação mesmo sabendo das dificuldades que poderiam surgir no tempo de realização da mesma.

Ao Major Engenheiro de Aeródromos Rui Ramos, meu coorientador, por todo o trabalho que teve durante a elaboração desta dissertação, de forma a que fosse possível que esta fosse realizada da melhor forma possível, mesmo em alturas de muito trabalho pessoal.

Deixo também uma palavra de apreço aos diretores de curso que me acompanharam ao longo de todo este caminho, com um particular ênfase ao Capitão Engenheiro de Aeródromos Luís Pereira pelo preocupação demonstrada com o bom desenrolar desta dissertação, assim como ao Diretor de Ensino Coronel Engenheiro Eletrotécnico Rui Ferreira pelo acompanhamento prestado para a realização deste trabalho.

A todos os camaradas da Direção de Infraestruturas, o meu obrigado por todo o apoio dado ao longo destes meses de dissertação e anos de curso, tendo sido fundamentais para que fosse possível, através dos conhecimentos por eles transmitidos, realizar um trabalho com melhor qualidade. Um agradecimento especial ao Capitão André Reis pelo empenho colocado e tempo despendido na ajuda da realização desta dissertação.

Um agradecimento especial à minha família e namorada por todo o apoio dado, não só nesta fase final do curso, mas durante todos os anos desde que entrei na Academia da Força Aérea, foram sempre um pilar que permitiu superar todos os obstáculos encontrados durante a realização do curso.

Por último, mas não menos importante, um agradecimento a todos os Mustangs, que se sem eles não seria possível chegar à fase final deste curso, por todo o apoio que deram durante os vários momentos da academia e pela compreensão demonstrada pela minha ausência em momentos de convívio, não só durante a realização da dissertação, mas durante as fases mais críticas do curso.

Índice geral

Resumo	i
Abstract	i
Agradecimentos.....	i
Índice de figuras	i
Índice de Quadros	i
Lista de abreviaturas	i
1. Introdução	1
1.1 Considerações iniciais.....	1
1.2 Trabalhos realizados na temática desta dissertação	2
1.3 Objetivos e metodologia da dissertação	3
1.3.1 Pesquisa bibliográfica	3
1.3.2 Ensaio existentes	3
1.3.3 Modelação e dimensionamento computacional de pavimentos	3
1.4 Estrutura da dissertação	4
2. Características gerais de pavimentos aeronáuticos.....	5
2.1 Considerações iniciais.....	5
2.2 Classificação e tipos de pavimentos	6
2.2.1 Pavimentos rígidos.....	6
2.2.2 Pavimentos flexíveis	7
2.2.3 Pavimentos semi-rígidos.....	8
2.3 Degradação de pavimentos rígidos.....	8
2.3.1 Fendilhação das lajes	9
2.3.2 Outras anomalias	9
2.3.2.1 Desagregação superficial	9
2.3.2.2 Escalonamento das lajes	10
2.4 Capacidade Estrutural.....	10
2.5 Estado superficial	11
2.5.1 Atrito	11
2.6 Metodologias de ensaios.....	11
2.6.1 Defletómetro de impacto	12
2.6.2 Coeficiente de atrito	12
2.6.3 Avaliação do estado de tensão induzido por ação do pré-esforço.....	13
2.7 Conclusões.....	14
3. Caracterização do pavimento aeronáutico da BA11	15
3.1 Considerações iniciais.....	15
3.2 Caracterização do processo construtivo	15
3.3 Ensaio de campo e valores obtidos.....	17
3.3.1 Inspeção visual	17
3.3.2 Coeficiente de atrito	18
3.3.3 Ensaio de carga com defletómetro de impacto.....	19
3.3.4 Avaliação do estado de tensão induzido por ação do pré-esforço.....	19

3.4	PCN	22
3.5	Conclusões	27
4.	Dimensionamento de reforço estrutural.....	29
4.1	Considerações iniciais	29
4.2	Modelação e dimensionamento.....	32
4.3	Conclusões	45
5.	Conclusões	49
5.1	Considerações finais	49
5.2	Conclusões gerais	49
5.3	Desenvolvimentos futuros	51
	Referências bibliográficas	53
	Anexo A - Movimentações nos aeroportos de Lisboa e Faro por companhia aérea	A1

Índice de figuras

Figura 2.1 - Diagrama de tensões num pavimento rígido	6
Figura 2.2 - Diagrama de tensões num pavimento flexível.....	8
Figura 2.3 - Esquematização de um defletómetro de impacto	12
Figura 3.1 - Movimentações empíricas do Boeing 737-800	24
Figura 3.2 - Dimensionamento da camada de betão	24
Figura 3.3 - PCN do pavimento.....	25
Figura 3.4 - Curvas ACN do Airbus A380-800	25
Figura 3.5 - Padrão de tráfego dimensionado.....	26
Figura 3.6 - PCN para condições existentes.....	26
Figura 4.1 - Curva granulométrica das várias misturas SMA	31
Figura 4.2 - Espessura SMA com TMN 9,5mm	36
Figura 4.3 - Espessura SMA com TMN 12,5mm (I)	36
Figura 4.4 - Espessura SMA com TMN 12,5mm (II)	37
Figura 4.5 - Espessura SMA com TMN 12,5mm (III)	37
Figura 4.6 - Espessura SMA com TMN 16mm	38
Figura 4.7 - Padrão de tráfego dimensionado.....	39
Figura 4.8 - PCN para reforço em SMA com TMN 12,5 mm (II) e 12,5 mm (III)	40
Figura 4.9 - PCN para reforço em SMA com TMN 12,5 mm (I).....	40
Figura 4.10 - PCN para reforço em SMA com TMN de 16 mm	41
Figura 4.11 - Padrão de tráfego dimensionado.....	42
Figura 4.12 - PCN recalculado para reforço em SMA com TMN 12,5 mm (II) e 12,5 mm (III).....	42
Figura 4.13 - PCN recalculado para reforço em SMA com TMN 12,5 mm (I)	43
Figura 4.14 - PCN recalculado para reforço em SMA com TMN 16 mm.....	43
Figura 4.15 - Proposta de reforço	44
Figura 4.16 - PCN para reforço em SMA proposto	45

Índice de Quadros

Quadro 3.1 - Valores limite de coeficiente de atrito	18
Quadro 3.2 - Zoneamento da pista principal	19
Quadro 3.3 - Identificação dos locais de ensaio	20
Quadro 3.4 - Armaduras de pré-esforço longitudinal	20
Quadro 3.5 - Armaduras de pré-esforço transversal.....	21
Quadro 3.6 - Tensões de compressão no betão na direção longitudinal, medidas nos ensaios SFJ	21
Quadro 3.7 - Tensões de compressão no betão na direção transversal, medidas nos ensaios SFJ	22
Quadro 4.1 - Distribuição granulométrica dos agregados	30
Quadro 4.2 - Distribuição granulométrica dos agregados (estudo realizado no LVCT do IST)	30
Quadro 4.3 - Caracterização dos SMA	30
Quadro 4.4 - N.º de movimentações de aeronaves nos principais aeroportos em Portugal continental	32
Quadro 4.5 - Tráfego das principais companhias aéreas a voar em Portugal e aeronave condicionante	34
Quadro 4.6 - Tráfego militar	35
Quadro 4.7 - Espessura de reforço a aplicar	38
Quadro 4.8 - PCN calculado para as diferentes misturas e espessuras	41
Quadro 4.9 - PCN calculado para as diferentes misturas e espessuras	44
Quadro 4.9 - PCN calculado para as diferentes misturas e espessuras	50
Quadro A.1 - Movimentos no aeroporto de Lisboa por companhia aérea (1º Trimestre)	A1
Quadro A.2 - Movimentos no aeroporto de Lisboa por companhia aérea (2º Trimestre)	A1
Quadro A.3 - Movimentos no aeroporto de Lisboa por companhia aérea (3º Trimestre)	A1
Quadro A.4 - Movimentos no aeroporto de Lisboa por companhia aérea (4º Trimestre)	A2
Quadro A.5 - Movimentos no aeroporto de Faro por companhia aérea (1º Trimestre)	A2
Quadro A.6 - Movimentos no aeroporto de Faro por companhia aérea (2º Trimestre)	A2
Quadro A.7 - Movimentos no aeroporto de Faro por companhia aérea (3º Trimestre)	A3
Quadro A.8 - Movimentos no aeroporto de Faro por companhia aérea (4º Trimestre)	A3

Lista de abreviaturas

ACN - *Aircraft Classification Number*

ANA - Aeroportos de Portugal, SA

ANAC - Autoridade Nacional de Aviação Civil

ASFT - *Airport Surface Friction Tester*

BA - Base Aérea

CEEU - Corpo de Engenheiros dos Estados Unidos

DI - Direção de Infraestruturas

FA - Força Aérea

FOD - *Foreign Object Damage*

FWD - *Falling Weight Deflectometer*

IST - Instituto Superior Técnico

K - Módulo de reação vertical do solo

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LVCT - Laboratório de Vias de Comunicação e Transportes

OTAN - Organização do Tratado Atlântico Norte

PCI - *Pavement Condition Index*

PCN - *Pavement Classification Number*

SFJ - *Small Flat Jack*

SMA - *Stone Mastic Asphalt*

TMN - Tamanho Máximo Nominal

1. Introdução

1.1 Considerações iniciais

A dissertação com o tema “Pavimentos aeronáuticos em betão pré-esforçado: reforço estrutural em *Stone Mastic Asphalt* aplicado à pista da Base Aérea N.º 11 em Beja”, realizado no âmbito da Dissertação de Mestrado em Aeronáutica Militar na especialidade de Engenharia de Aeródromos, segue a linha de investigação aplicada a estudos desenvolvidos no Instituto Superior Técnico e na Academia da Força Aérea. O *Stone Mastic Asphalt* (SMA) é uma mistura betuminosa com algumas características de composição que lhe permitem suportar tráfego muito pesado e que será descrito no Capítulo 4.

Tem-se verificado no país, desde 2013, um aumento do número de movimentos comerciais e não comerciais, assim como do número de passageiros transitados, mas estes com maior incidência desde 2009 [1]. Analisando os dados relativos ao ano 2016, e comparando com 2017, é de destacar um aumento de 9,9% em relação à quantidade de aterragens e descolagens nas infraestruturas nacionais, o que se traduz num aumento de cerca 43 milhares de movimentos. Para o mesmo período, verificou-se um aumento no valor de 16,4% do número total de passageiros transportados, o que corresponde a um crescimento de 7,4 milhões de passageiros. Por sua vez, relacionando o número de movimentos com o número de passageiros movimentados, pode-se observar que, de 2010 para 2016, ocorreu um aumento no número médio de passageiros por voo, no valor de 85 para 110, respetivamente. Esta realidade antecipa uma necessidade de adaptação, que permita acomodar uma maior quantidade de movimentos de aeronaves, em que estas terão, cada vez mais, maior capacidade de transporte/carga, com maior exigência ao nível dos pavimentos aeronáuticos [1].

Associado à crescente quantidade de movimentos de aeronaves e de passageiros encontra-se a capacidade de transporte [2]. Foi neste âmbito que foi construída a aeronave Airbus A380. No entanto, e atendendo às suas especificidades, compreende-se que poucos aeródromos têm capacidade para a sua operação. É neste contexto que se insere a importância desta dissertação, uma vez que se pretende avaliar a capacidade estrutural de um pavimento para operação do A380. Neste sentido, a avaliação da capacidade de carga cinge-se a um pavimento em betão armado pré-esforçado, com reforço em SMA, tendo-se como referência o pavimento da pista da Base Aérea (BA) 11.

O A380 é uma aeronave com capacidade de transporte variável: 379 passageiros, na configuração com 4 classes; 544 passageiros, na configuração com 3 classes; 615 passageiros, na configuração de 2 classes; e 868 passageiros, na configuração de 1 classe. Uma forma de responder ao aumento de procura a nível de movimentos aeronáuticos, e de permitir que as maiores companhias aéreas possam movimentar as suas maiores aeronaves, é tornar os

pavimentos aeronáuticos dotados de capacidade estrutural e funcional compatível com as novas solicitações.

Considerando que o aeroporto de Lisboa atingiu quantidades de movimentações de aeronaves e de passageiros próximos dos seus limites máximos [3], torna-se necessário recorrer a alternativas que permitam atender às novas solicitações. Entre as várias soluções, encontra-se a construção de novos aeroportos, ou o redimensionamento dos existentes. No entanto, dotar os aeroportos existentes de capacidade para a movimentação de novas aeronaves, com maior capacidade de carga, sem risco para os pavimentos, equipamentos e passageiros, é uma das alternativas, em que este trabalho pretende ser um contributo. Assim, a reabilitação estrutural do pavimento da BA11, insere-se numa perspetiva de aumento da capacidade de carga que, evitando a construção de um pavimento novo, permite receber mais passageiros por aeronave, aeronaves com maior capacidade de carga e maior quantidade de movimentos.

Visto tratar-se de uma pista que está associada a uma base militar e a um aeroporto civil, esta melhoria vem contribuir para o aumento de capacidades de ambas as partes. Por um lado, permite que maiores aeronaves civis de passageiros ou de carga possam aterrar em Portugal, sem limitações técnicas, por outro, contribui para a capacidade da Força Aérea, na medida em que permite operar aeronaves de maiores dimensões e com requisitos mais exigentes, alinhados com os compromissos atuais e futuros, com a Organização do Tratado Atlântico Norte (OTAN).

1.2 Trabalhos realizados na temática desta dissertação

No âmbito da dissertação de mestrado do Engenheiro Rodolfo Guilherme Nunes e Silva Arnaldo, intitulada *“Reabilitação Estrutural de Pavimentos Aeronáuticos em Betão Pré-Esforçado”* [4] foi desenvolvido um estudo de hipóteses de reforço estrutural para o pavimento aeronáutico da BA11. Neste estudo, foram avaliadas quatro formas de reforço, assim como realizado uma comparação de custos entre as mesmas, tendo em conta o tráfego aéreo na altura.

O relatório da construção do pavimento aeronáutico de Beja, realizado em 1962 por António Cabral Mello, *“Construção dos Pavimentos Rígidos em Betão Pré-Esforçado nas Pistas da Base Aérea nº 11 em Beja”*, constitui um contributo de enorme relevância para o desenvolvimento desta dissertação, visto tratar-se de um “testemunho” de um aluno de engenharia civil que acompanhou toda a construção da pista da BA11, onde se encontra relatado com pormenor as formas de dimensionamento utilizadas, métodos construtivos e soluções adotadas [5].

Os estudos estatísticos realizados pela Autoridade Nacional de Aviação Civil, relativos aos últimos anos, são de elevada importância para análise das necessidades atuais do país, assim como realizar previsões com sugestões relativas a melhores soluções [1].

1.3 Objetivos e metodologia da dissertação

Esta dissertação tem como objetivo estudar, com base em ensaios realizados desde o ano 2000 o estado em que o pavimento aeronáutico da pista (01 L - 19 R) da BA11 se encontra, e propor, utilizando a aeronave Airbus A380-800 e alterações no tráfego aéreo em Beja, como referência, uma camada de reforço com SMA, que permita sua operação sem restrições estruturais.

Deste modo, o dimensionamento do reforço estrutural realizado no âmbito da dissertação, vem contribuir para a aumento de capacidades civis e militares, através da operação da pista por voos internacionais de aeronaves de grande porte, assim como, por aeronaves militares de maiores dimensões que requerem condições mais exigentes do pavimento.

1.3.1 Pesquisa bibliográfica

Inicialmente, realizou-se uma pesquisa bibliográfica centrada na descrição de princípios de construção dos pavimentos rodoviários e em como estes se assemelham aos pavimentos aeronáuticos e, posteriormente, às metodologias de reabilitação utilizadas para os diferentes tipos de pavimentos.

Com esta pesquisa, teve-se como objetivo compreender a constituição dos vários tipos de pavimentos rodoviários e aeronáuticos, procurando caracterizar o pavimento objeto de estudo, assim como permitir a escolha de métodos de reabilitação e reforço do mesmo. Também foram avaliadas as necessidades aeronáuticas no âmbito comercial existentes para o país.

1.3.2 Ensaios existentes

Tendo por objetivo determinar uma camada de reforço, recorrendo a um SMA, de forma a aumentar o *Pavement Classification Number* (PCN) da pista, para valores que tornem possível o seu acesso e utilização, por parte de aeronaves Airbus A380, foi necessário caracterizar as condições em que o pavimento da pista e a fundação se encontram atualmente.

De modo a ser possível essa caracterização, recorreu-se a ensaios realizados na pista nos últimos anos. Assim, consultou-se os ensaios realizados pela COBA - Consultores de Engenharia e Ambiente S. A., pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), pela Direção de Infraestruturas (DI) da Força Aérea (FA) e pela Aeroportos de Portugal, S. A. (ANA) [6] **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**]. Recorreu-se, também, aos valores calculados pelo Engenheiro Rodolfo Arnaldo no âmbito da sua dissertação [4].

1.3.3 Modelação e dimensionamento computacional de pavimentos

Tendo em vista o objetivo da dissertação, foi modelada a estrutura de pavimento existente, recorrendo a valores de ensaios anteriores. A partir da modelação estrutural, considerou-se como solicitações as ações constituídas pelas movimentações e cargas relativas aos diferentes tipos de aeronaves.

A partir do modelo, utilizando os programas de dimensionamento PCASE e FAARFIELD, foi possível determinar a espessura da camada de reforço em SMA e características mecânicas respetivas de modo a que o pavimento da BA11 tenha capacidade para a operação da aeronave Airbus A380, nas condições previstas.

1.4 Estrutura da dissertação

A dissertação é constituída por cinco capítulos, referências bibliográficas e anexos:

- **capítulo 1: Introdução** - neste capítulo, faz-se o enquadramento do tema da dissertação, definindo o seu objetivo e a metodologia adotada e, finalmente, apresenta-se a estrutura da dissertação;
- **capítulo 2: Características gerais de pavimentos aeronáuticos** - no segundo capítulo, apresenta-se um levantamento do estado da arte relativamente aos diferentes tipos de pavimentos, com foco na determinação das suas características e anomalias principais, e ensaios de âmbito estrutural e funcional;
- **capítulo 3: Caracterização do pavimento aeronáutico da BA11** - no terceiro capítulo, descreve-se o objetivo e a metodologia adotada na recolha de dados; caracteriza-se o estado estrutural e funcional do pavimento; e analisa-se os dados recolhidos com determinação do PCN do pavimento;
- **capítulo 4: Dimensionamento de reforço estrutural** - no quarto capítulo, apresenta-se uma caracterização do material a utilizar para o reforço, o SMA; a metodologia para o dimensionamento do reforço estrutural do pavimento; com base nos dados recolhidos, e de acordo com as características do pavimento, estudou-se a espessura de reforço a aplicar para garantir o PCN pretendido; por fim, discute-se os resultados obtidos, avaliando a validade do modelo de dimensionamento aplicado a SMA;
- **capítulo 5: Conclusões** - no último capítulo, expõe-se as conclusões gerais sobre o trabalho desenvolvido e as recomendações sobre desenvolvimentos futuros.
- **Anexo A - Movimentações nos aeroportos de Lisboa e Faro por companhia aérea** - O anexo exposto insere-se com o objetivo de demonstrar e facilitar a compreensão do modo como foi considerado o tráfego aéreo e quais as aeronaves nele incluídas.

2. Características gerais de pavimentos aeronáuticos

2.1 Considerações iniciais

Com a evolução de técnicas construtivas desenvolveram-se vários tipos de pavimentos: rígidos, realizados com recurso a um ligante hidráulico; flexíveis, realizados com recurso a um ligante betuminoso; e semi-rígidos, um tipo de pavimentos que é realizado recorrendo a camada rígida, que não está em contacto com o tráfego, e camadas mais superficiais betuminosas. Cada tipo de pavimento apresenta certas características que devem ser aproveitadas, por forma a melhorar o desempenho do pavimento para o objetivo com que foi projetado, ou seja, suportar o tráfego e oferecer-lhe boas condições de rodagem **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**].

A aferição do estado em que um pavimento se encontra, ao nível da sua superfície e da sua estrutura, é essencial para uma gestão eficaz do tráfego que ali pode circular, assim como para a garantia da segurança da sua utilização. O conhecimento desta informação permite determinar a capacidade de carga que é possível aplicar ao pavimento, sem que ocorram danos no mesmo, ou planejar medidas de reparação quando for necessário ultrapassar os valores resistentes do pavimento.

De forma a manter um historial correto do pavimento é necessário proceder-se a uma observação regular do mesmo, sendo que, uma correta calendarização de observações do estado do pavimento é uma componente essencial para a definição da boa manutenção do mesmo.

No caso duma pista aeronáutica, sendo a sua observação uma fase importante, é necessário calendarizar ensaios na mesma, por forma a determinar a evolução da capacidade estrutural do pavimento.

Esta avaliação tem como objetivo determinar o nível de desempenho mecânico do pavimento, tendo em consideração fatores climáticos e o tráfego prévio que utilizou a infraestrutura, permitindo estimar a “vida residual” do pavimento e o número de passagens que a infraestrutura ainda pode suportar **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**].

Para uma completa avaliação do estado de um pavimento aeronáutico, pode-se considerar, como referência, os parâmetros dos pavimentos rodoviários:

- qualidade estrutural;
- qualidade funcional (camada de desgaste ou estado superficial);
- regularidade longitudinal;
- regularidade transversal;
- atrito transversal.

Esta avaliação deve ser complementada com ensaios realizados no pavimento, de forma a compreender o estado em que este se encontra, e verificar se o mesmo garante as condições necessárias para o seu funcionamento.

2.2 Classificação e tipos de pavimentos

Os pavimentos aeroportuários ou rodoviários são constituídos, de forma geral, por uma camada superficial, com a função de resistir ao desgaste devido à utilização da via, e por uma série de camadas, com resistência suficiente para, em conjunto, suportarem o tráfego estimado. Sob a camada de desgaste superficial em contacto com o tráfego, encontra-se, pelo menos, as camadas de base e de sub-base. Todas têm como principal objetivo resistir estruturalmente às cargas induzidas pelo tráfego e aos fatores ambientais externos, sendo que a de desgaste deve ter características de superfície compatíveis com a segurança e comodidade do rolamento **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**].

Os pavimentos aeronáuticos e rodoviários podem ser diferenciados em três tipos: rígidos, semi-rígidos e flexíveis **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**], como já se descreveu.

2.2.1 Pavimentos rígidos

Os pavimentos rígidos são muitas vezes constituídos por uma laje de betão de cimento, como camada superficial, uma camada de base em solo-cimento ou um betão pobre e, dependendo da fundação, que é em geral formada por solo natural, pode, ainda, haver uma sub-base em material britado não tratado. A resistência própria elevada, característica deste tipo de pavimento, devido sobretudo à camada de betão de cimento, impede o pavimento de sofrer deformações acentuadas quando submetido a cargas elevadas. Na Figura 2.1 é possível observar como se desenvolve o diagrama de tensões quando o pavimento rígido está sujeito a uma carga: a distribuição de tensões para as camadas inferiores é muito atenuada por um funcionamento à flexão da laje superior, suportando uma boa parte da tensão induzida pela carga.

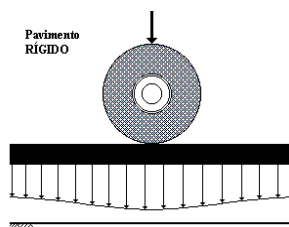


Figura 2.1 - Diagrama de tensões num pavimento rígido

Pelo facto de o betão de cimento apresentar melhor capacidade de resistência a agentes químicos (combustíveis, por exemplo), quando comparado ao betão betuminoso, os pavimentos rígidos são colocados, principalmente, nas placas e caminhos de acesso, em pavimentos aeronáuticos. No entanto, este tipo de pavimentos pode, também, ser utilizado como pavimento de pista, como é o caso da pista da BA11.

Devido às alterações de volume provocadas por variações de temperatura, a laje de betão tem de ser subdividida por juntas, evitando, assim, a abertura de fendas na mesma. A camada de desgaste é, de facto, a camada estrutural mais importante como se descreveu. Esta característica faz com que o controlo de rotura do pavimento seja realizado principalmente na camada de desgaste, controlando as tensões máximas de tração aplicadas na base e nos bordos da laje.

De acordo com Kaemer (1996), os pavimentos rígidos podem ser caracterizados em cinco categorias diferentes, sendo esta distinção feita pelo método de controlo do fendilhamento devido à retração [8]:

- pavimentos de betão não armado, com juntas transversais e longitudinais;
- pavimentos de betão armado, com juntas, com ou sem passadores;
- pavimentos de betão armado contínuo;
- pavimentos de betão armado pré-esforçado (caso em estudo);
- pavimentos formados por elementos prefabricados.

2.2.2 Pavimentos flexíveis

Os pavimentos flexíveis apresentam várias camadas na sua constituição, sendo a camada de desgaste constituída por betão betuminoso, seguida de uma camada de base, também em mistura betuminosa, ou em agregado britado de granulometria extensa, por vezes designando-se de *tout-venant*, e uma camada de sub-base também em agregado britado de granulometria extensa.

Este tipo de pavimentos, quando submetido a esforços, apresenta um comportamento flexível, isto é, deformando-se sem que atinja a rotura, e recuperando da mesma, em quase toda a dimensão, com a remoção da carga. Nestes pavimentos, as tensões devido ao tráfego vão dispersando ao longo das camadas até atingir a fundação (Figura 2.2), ao contrário dos rígidos.

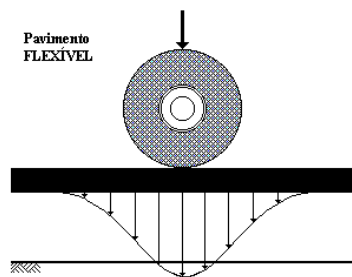


Figura 2.2 - Diagrama de tensões num pavimento flexível

2.2.3 Pavimentos semi-rígidos

Os pavimentos semi-rígidos caracterizam-se por ser um tipo de pavimento constituído por uma camada de desgaste (e, eventualmente, também uma de regularização) em betão betuminoso, sendo a camada de base tratada com cimento e a de sub-base tratada como para um pavimento flexível.

Este tipo de pavimento apresenta uma capacidade de deformação maior, quando comparada com a de um pavimento rígido, mas menor que a de um pavimento flexível. A presença de uma camada rígida na base, garante um incremento na capacidade resistente às tensões verticais inerentes ao tráfego.

2.3 Degradação de pavimentos rígidos

A degradação de pavimentos rígidos pode ser associada a duas categorias principais de causas gerais: de prescrição de materiais e de dimensionamento **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**].

A primeira categoria de causas pode ser diretamente relacionada com a deterioração ou deficiência da estrutura. A degradação da estrutura pode dever-se à má escolha de material aplicado no pavimento, com características mecânicas inadequadas, ou material não durável, podendo apresentar reações entre os álcalis e a sílica reativa e outros tipos de materiais com alguns tipos de carbonatos. O alinhamento impróprio, torção ou encurvadura das armaduras é, também, uma das causas de degradação dos pavimentos, assim como esforços associados à contração ou à expansão do betão **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**].

A segunda categoria de causas está relacionada com o dimensionamento estrutural do pavimento e com a definição das suas camadas. Este tipo de anomalias é observável através de roturas no betão e danos nas extremidades das lajes, cantos ou juntas **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**].

2.3.1 Fendilhação das lajes

O aparecimento de fendas no betão pode dever-se a causas distintas. As fendas causadas antes do endurecimento são devidas a movimentos de construção, à retração ou contração do betão. As fendas causadas após o endurecimento são devidas a reações químicas, a movimentos físicos, a mudanças térmicas, a concentrações de tensões, a projeto estrutural subdimensionado e a acidentes.

O betão é constituído por vários elementos que afetam ou possibilitam o aparecimento de fendas, sendo a água uma das maiores causas no aparecimento das mesmas. Verificou-se que, quanto mais água é utilizada, maior é a tendência à fendilhação, visto a água aumentar a retração do betão e reduzir a sua resistência. A quantidade de cimento também é importante; em geral, os betões mais ricos em cimento fissuram mais. A composição mineral, a forma, a textura e a variação de material do agregado afetam as proporções exigidas, o coeficiente térmico, a retração durante a cura, a rigidez, a fluência e a resistência do betão. Algumas misturas também podem afetar a fendilhação, devido aos seus efeitos sobre fatores contributivos, como o desenvolvimento da capacidade resistente, contração e fluência [10].

A utilização do pavimento por veículos e cargas respetivas, ao longo do seu tempo de vida, encontra-se associada à repetição da aplicação de tensões de tração no pavimento que conduzem ao aparecimento de fendas por fadiga. Para um dimensionamento adequado do pavimento, e boa escolha de materiais aplicados na sua construção, estas fendas devem surgir apenas no final do tempo de vida útil. Assim, pode-se fazer uma correlação entre o aparecimento das fendas antes do tempo previsto e a existência de uma insuficiência estrutural do pavimento, quer por sub-dimensionamento, escolha de materiais de má qualidade para o objetivo de utilização, ou má execução dos trabalhos de construção [5]. O desenvolvimento destas fendas é progressivo com o passar do tempo e com a utilização do mesmo.

2.3.2 Outras anomalias

2.3.2.1 Desagregação superficial

A desagregação superficial corresponde à libertação de material constituinte do betão. Este tipo de anomalia pode ocorrer ao longo das juntas ou na laje, com causas diferentes para cada situação. Aquando o aparecimento de material desagregado ao longo da junta, este pode ser relacionado com o curto espaçamento das mesmas ou com a sua deficiente selagem, que permite a entrada e incrustação de agregados que, por ação mecânica dos pneus, leva ao seu posterior esmagamento. O aparecimento de desagregação do pavimento nas juntas ocorrerá quando se verifique o escalonamento das lajes por bombagem de finos.

Quando este fenómeno se verifica na superfície da laje pode dever-se a fatores causados pelo desgaste, produzido pela passagem das aeronaves, ou à utilização de materiais não indicados,

durante a fase de construção, que levam, por sua vez, ao arranque de agregados do betão ou ao desprendimento de placas **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**].

2.3.2.2 Escalonamento das lajes

O fenómeno de escalonamento das lajes ocorre quando o pavimento, após a ação repetida de cargas, reúne as seguintes condições:

- insuficiente proteção das juntas do pavimento;
- penetração de água até às camadas de sub-base do pavimento e do solo de fundação;
- a camada de sub-base ou o solo de fundação são constituídos por materiais erodíveis.

Quando se verifica a situação previamente descrita dá-se início ao mecanismo de escalonamento, que sucede em três fases **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**].

Numa primeira fase, as ações aplicadas à laje causam deformações graduais na fundação, que se encontra humedecida devido à penetração de água nas várias camadas da mesma. Seguidamente, na segunda fase, com a passagem do pneu para a laje seguinte, a primeira recupera, de forma brusca, da deformação causada, provocando a aspiração de água misturada com finos que é bombeada aquando a deformação da fundação da segunda laje, fenómeno dado pelo nome de “bombagem de finos”, que leva à erosão da cintura da deformação.

Com o decorrer do tempo, e inerente repetição das duas fases descritas, provoca-se uma contínua alteração da granulometria da fundação na zona próxima da junta. Passando, então, a existir uma acumulação de agregados debaixo do bordo da primeira laje e à falta dos mesmos na segunda, criando um desnível entre os bordos das duas; a ocorrência este desnível corresponde à fase três **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**].

2.4 Capacidade Estrutural

A capacidade estrutural de um pavimento pode ser inicialmente avaliada por métodos observacionais, pois as deflexões ou assentamentos à superfície dos pavimentos quando sujeitos a cargas são o melhor indicador do estado estrutural da infraestrutura, quer da camada superficial, quer das sub-camadas.

Através de um estudo que identifique as deflexões do pavimento é possível determinar e caracterizar a capacidade do conjunto “pavimento-fundação”, sendo possível determinar a contribuição das várias camadas para a estrutura do pavimento, tendo em conta os valores de deflexões observadas a várias distâncias do ponto de aplicação do carregamento **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**].

‘A capacidade estrutural do pavimento pode ser avaliada a partir de medições realizadas com equipamentos que têm como função a medição da deflexão do pavimento em movimento ou em

modo estacionário. Estes equipamentos são denominados defletómetros, sendo os mais representativos:

- viga Benkleman - para ensaio estático;
- deflectómetro FLASH - para o ensaio dinâmico;
- curviâmetro;
- defletómetro de impacto *falling weight deflectometer* (FWD) - para o ensaio estático.

No âmbito desta dissertação, apenas se irá considerar o defletómetro de impacto, visto ser o equipamento utilizado nos ensaios analisados, no pavimento da BA11.

2.5 Estado superficial

Sendo a camada superficial aquela que se observa de forma direta, as anomalias observadas constituem o parâmetro preponderante em todo o processo de análise. Com a realização de um conjunto de observações calendarizadas de acordo com a evolução de anomalias, de forma correta, objetiva e completa, é possível obter a identificação das anomalias existentes, assim como determinar a evolução das mesmas e calendarizar manutenções ao pavimento **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**].

2.5.1 Atrito

O atrito é a variável que permite o controlo direcional e a possibilidade de imobilização da aeronave. Assim, quando associado aos parâmetros de traçado da pista, tornam-se fundamentais para a garantia da segurança das operações. A aderência pneu/pavimento, que é tanto melhor quanto melhores as características superficiais (entre as quais o atrito), contribui para a redução da distância de paragem das aeronaves e para a possibilidade do controlo direcional durante as manobras de aterragem e de descolagem, principalmente caso a superfície esteja molhada. A presença de uma lâmina de água entre o pneu e o pavimento poderá impossibilitar o contacto entre as duas superfícies e dar origem à hidroplanagem [11]. A textura da superfície de um pavimento tem um papel fundamental para a qualidade funcional, no que diz respeito ao desenvolvimento de forças de atrito entre o pneu e o pavimento, mesmo em condições húmidas, assim como permitir o desenvolvimento de condições de resistência ao movimento **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**].

2.6 Metodologias de ensaios

Tendo em consideração o uso dos pavimentos aeronáuticos, considera-se necessário descrever os principais ensaios realizados para avaliação estrutural e funcional, focando-se o ensaio de carga com defletómetro de impacto (FWD), o ensaio de determinação do coeficiente de atrito e avaliação do estado de tensões, ensaio para caracterização dos aços de pré-esforço e ensaio *small flat jack* (SFJ).

2.6.1 Defletómetro de impacto

O FWD corresponde a um equipamento que se encontra normalmente acoplado a uma viatura que, com a aplicação de uma carga à superfície do pavimento, avalia a resposta do mesmo através de medições da sua deflexão em toda a zona de impacto. Os valores correspondentes à carga aplicada, tempo de aplicação e área da mesma, são ajustados de forma a corresponder à carga de um camião standard carregado que circula no pavimento, como definido por Sharma e Das (2008) [13].

A viatura ao qual o defletómetro está ligado é equipada com o equipamento informático de controlo do ensaio, que tem como objetivo registar os valores medidos pelo defletómetro, assim como, tratar os mesmos.

Este sistema é composto por um sistema mecânico com um eixo vertical por onde a massa se desloca, contendo na sua base um conjunto de amortecedores, que transmitem a carga para uma placa rígida, com um diâmetro compreendido entre os 300 e 400mm (Figura 2.3).

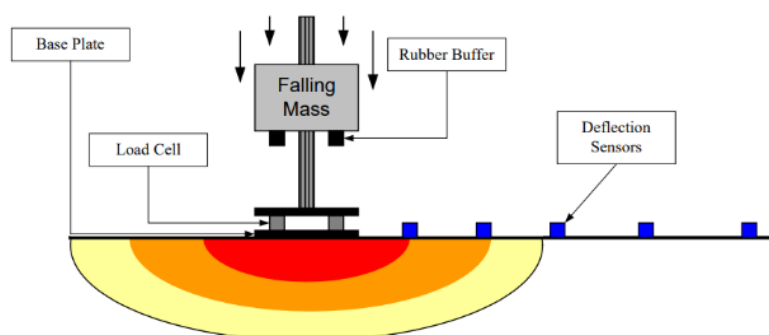


Figura 2.3 - Esquemática de um defletómetro de impacto [14]

2.6.2 Coeficiente de atrito

De acordo com o *National Cooperative Highway Research Program* - NCHRP43, o atrito dos pavimentos corresponde à força resistente ao movimento desenvolvida entre a superfície do pavimento e o pneu do veículo. Esta variável caracteriza a rugosidade que se desenvolve entre duas superfícies de contacto, sendo uma variável diretamente proporcional, isto é, quanto maior o atrito, maior a força de contacto entre superfícies [11].

O coeficiente de atrito expressa, então, de uma forma adimensional, uma relação entre a força tangencial de atrito desenvolvida entre o pavimento e o pneu e a força normal de reação à carga, que é transmitida pelo pneu ao pavimento [11].

A avaliação dos coeficientes de atrito, tem como objetivo verificar se as condições superficiais do pavimento são suficientes para garantir a segurança das operações aéreas nas condições mais desfavoráveis (pavimento molhado).

Para este ensaio utilizou-se o equipamento *Airport Surface Friction Tester* sendo a metodologia de ensaio utilizada descrita nas seguintes fases:

- introdução das pressões de ensaio nas rodas tratoras do veículo de ensaio, de 36 psi nas rodas dianteiras e de 42 psi nas rodas traseiras e de 30 psi na roda de ensaio;
- calibração da carga vertical e de fricção com aferição das tensões normalizadas e reconfirmação pelos “*test sensors*”;
- reabastecimento dos tanques de água para a realização dos ensaios de aspersão;
- determinação dos perfis a ensaiar;
- início dos ensaios pelo lado direito relativamente ao eixo, utilizando um sentido como referência.

2.6.3 Avaliação do estado de tensão induzido por ação do pré-esforço

Tendo em vista a avaliação das tensões induzidas nas lajes de betão pela ação do pré-esforço, podem ser realizados dois tipos de ensaios específicos, que não são habitualmente utilizados em pavimentos [4]:

- ensaios para caracterização das forças instaladas nos aços de pré-esforço, envolvendo a abertura de roços nas pistas, e o destacamento de provetes dos aços;
- ensaios SFJ para medição do estado de tensão nas lajes de betão, envolvendo a abertura de rasgos nas lajes de betão, com uma serra circular e a realização de ensaios de carga com macacos planos.

O primeiro ensaio segue a seguinte metodologia:

- abertura de roços no pavimento nas direções longitudinais e transversais até atingir a localização das armaduras;
- observação visual das armaduras e seleção de dois fios da mesma para ensaio;
- marcação nos dois fios com uma distância de 40 cm e medição da respetiva distância com um alongamento;
- corte dos fios com um comprimento total de 80 cm (20cm para cada lado das marcas);
- tração dos fios até que a distância entre pontos de referência seja igual à medida previamente definidos;
- registar a força correspondente equivalente ao pré-esforço instalado no fio, no local.

O ensaio SFJ tem por base a seguinte metodologia:

- primeiramente, realizar uma abertura de um rasgo por forma a obter uma leitura, recorrendo a um alongamento, das deformações locais produzidas;
- posteriormente, é introduzida uma almofada no rasgo, aplicando uma pressão no seu interior até ser restaurado o campo de deformações original.

2.7 Conclusões

Neste capítulo, foi apresentado a caracterização geral dos pavimentos, assim como, as anomalias passíveis de serem identificadas e os ensaios para caracterização estrutural ou funcional do pavimento.

Pode-se concluir que a escolha do tipo de pavimento utilizado deve ser realizada de acordo com a missão a que este se destina, visto que cada tipo de pavimento tem vantagens próprias, como a elevada capacidade resistente proporcionada pelos pavimentos rígidos, ou a capacidade de deformação do pavimento flexível.

Sendo o pavimento da pista da BA11 um pavimento rígido, descreveram-se as anomalias que este tipo de pavimentos pode desenvolver ao longo da sua vida útil. Entre as várias anomalias possíveis, é de destacar o fendilhamento das lajes, visto tratar-se de um problema que, em caso de desenvolvimento e falta de manutenção, afetará a capacidade estrutural do pavimento, principalmente por se tratar de um pavimento pré-esforçado.

Por último, foi abordado o tipo de ensaios que se podem realizar para avaliar, estruturalmente e funcionalmente, o comportamento do pavimento. Estes ensaios permitem compreender a extensão da necessidade de reabilitação estrutural, aplicação de camadas de reforço, ou da necessidade melhoramentos a nível funcional, bem como permitir definir o plano de inspeção para manter o desenvolvimento de anomalias sob controlo.

3. Caracterização do pavimento aeronáutico da BA11

3.1 Considerações iniciais

Os elementos de cálculo utilizados para dimensionamento da pista, na data para abertura do concurso, em 1961, para a construção dos pavimentos aeronáuticos da BA11, em Beja, baseavam-se no método do dimensionamento de pavimentos rígidos do Corpo de Engenheiros dos Estados Unidos (CEEU) [15]. De acordo com este método, o dimensionamento tinha como base a missão destinada para aquele aeródromo e, por conseguinte, a aeronave crítica para a execução da mesma [4].

A missão atribuída para a pista da BA11, tendo em consideração tratar-se de uma altura pós final da segunda grande guerra, foi a de ter capacidade para operação de bombardeiros pesados, aeronaves que marcaram o desenrolar da guerra. Para esta missão, a aeronave crítica atribuída foi o B36 da *Convair* (USA) e o dimensionamento da infraestrutura teve em consideração os ábacos desenvolvidos pela CEEU, à data, para pavimentos rígidos.

Por forma a analisar o estado atual do pavimento de Beja, será necessário recorrer aos ensaios existentes, realizados recentemente ao pavimento. Tendo como base esses ensaios, e considerando que não houve alterações ao pavimento num curto espaço de tempo que diminuam a validade destes valores, será possível obter as condições necessárias para se proceder, então, ao cálculo de dimensionamento do reforço estrutural e funcional.

3.2 Caracterização do processo construtivo

Atendendo ao método de dimensionamento utilizado em 1961, foi determinada a espessura das lajes do pavimento em betão através dos ábacos de dimensionamento, tendo sido necessário conhecer as seguintes variáveis (dependentes da aeronave crítica e características dos materiais e do pavimento):

- trem em triciclo;
- área do contacto dos pneus;
- trem de tandem de roda dupla;
- resistência à flexão do betão;
- módulo de reação do solo;
- carga máxima transmitida ao pavimento pelo grupo de rodas principal.

Tendo em consideração as variáveis e a interpolação com os ábacos, o projetista concluiu que as lajes de betão teriam que ter uma espessura de 36 cm sobre uma camada base de solo-cimento,

com 15 cm de espessura, e uma sub-base de saibros com uma espessura média de 40 cm. Devido às elevadas dimensões de espessura das lajes de betão considerou-se outros métodos.

O pavimento aeronáutico da BA11, foi construído em 1964, tendo em conta o que vinha sendo realizado até então, na Alemanha, pelo que se optou por pavimento rígido com placas de betão pré-esforçado com 16 cm de espessura.

Das várias hipóteses existentes na altura, foi adotado o processo do leito lento. Este corresponde a um processo com ligação imediata, em que o aço para pré-esforço na direção longitudinal não é colocado em bainhas, mas é pré-esforçado, antes da colocação do betão entre os encontros constituídos por um processo adequado [5].

Este processo é caracterizado da seguinte forma [5]:

- em cada leito de pré-esforço as armaduras longitudinais são submetidas a tensão entre os encontros de pré-esforço que se encontram nos topos de leito, antes da betonagem. As dimensões do leito de pré-esforço utilizado são, aproximadamente, de 670 m de comprimento e 7,5 m de largura;
- a execução total em betão pré-esforçado, não existindo, então, no pavimento, zonas não pré-esforçadas e sendo executado exclusivamente com betão de fabricação no local numa só aplicação;
- o pré-esforço homogéneo, resultante da supressão do atrito das bainhas e da distribuição uniformemente proporcional dos arames na secção de betão;
- a ligação dos arames ao betão é direta, conseguindo-se a máxima aderência e ligações periféricas, e a proteção contra a corrosão dos arames de pré-esforço;
- a espessura da placa mínima é possível devido à supressão das bainhas que, no pré-esforço com ligação, é necessário na direção longitudinal da placa de betão, pelo que são reduzidas as solicitações sujeitas às influências climáticas;
- pode-se introduzir um pré-esforço parcial imediato, pelo corte de alguns arames, facilmente adaptado às necessidades apresentadas, partindo apenas do extremo já betonado;
- os dispositivos das diversas juntas, nos quais se processa a amarração longitudinal, são montados antes da betonagem, obtendo-se uma aplicação uniforme do pré-esforço parcial imediato, sem que se torne necessário a participação da aderência e da ligação periférica dos arames de pré-esforço.

A armadura de pré-esforço encontra-se disposta inferiormente ao eixo médio da placa, tendo sido primeiramente colocada a armadura longitudinal inferior [5].

A betonagem do pavimento foi executada em faixas com 7,5m de largura. Os arames de pré-esforço longitudinais foram submetidos a tensão antes da betonagem da faixa correspondente. As

placas de betão foram protegidas com um produto de cura de forma a evitar a dessecação prematura da superfície [5]. O pré-esforço total foi, apenas, aplicado aquando a resistência necessária tenha sido atingida pelo betão.

Ao longo da direção transversal do pavimento, os cabos de pré-esforço são inseridos em bainhas colocadas antes da betonagem ou posteriormente introduzidas, como aplicado em sistemas de pós-tensão. Visto tratarem-se de elementos de pré-esforço com reduzido comprimento é desprezável o efeito do atrito na bainha.

O elemento fundamental do dispositivo de junta é a sua chapa frontal de aço, constituída por um perfil em L e que, após o corte de alguns cabos, conferem uma distribuição uniforme de tensões sobre o betão, sendo este fator fundamental para a aplicação do pré-esforço parcial, evitando, assim, que a zona de corte entre o cabo de aço e o betão seja uma solicitação relevante.

Ao longo da pista é possível encontrar quatro tipos de juntas, normalmente utilizadas em leito de pré-esforço:

- a junta de pré-esforço do tipo 1 é montada na transição longitudinal de uma laje de betão pré-esforçado, com um pavimento em betão simples ou um pavimento em betão betuminoso;
- a junta de pré-esforço do tipo 2, por sua vez, está prevista ser utilizada no início e no fim de uma laje de betão pré-esforçado, quando não é necessária nenhuma ligação, como é o caso do início e do fim de uma pista;
- a junta de pré-esforço do tipo 3 é utilizada como junta de encontro entre leitos de pré-esforço adjacentes;
- a junta de pré-esforço do tipo 4 é colocada entre duas lajes consecutivas do mesmo leito de pré-esforço e é provida apenas de placas de tração.

3.3 Ensaios de campo e valores obtidos

De modo a ser possível atingir os objetivos propostos para esta dissertação é necessário conhecer o estado atual da pista. Para a caracterização do pavimento, foram utilizados valores de ensaios obtidos em anos anteriores. Este estudo permitiu, também, compreender o padrão de evolução de degradação do pavimento da pista, assim como o estado do pré-esforço aplicado. Com o estudo destes valores, é possível determinar as zonas mais afetadas, assim como determinar o reforço a aplicar no pavimento.

3.3.1 Inspeção visual

Durante a inspeção visual efetuada aos pavimentos da BA11, em 2002, por parte dos técnicos da DI e do LNEC constatou-se que estes se encontram em bom estado de conservação. Nesta

inspeção verificou-se assentamentos diferenciais, fendilhação, desagregação superficial e desincrustações das lajes de betão pré-esforçado.

A rugosidade aparente da superfície das lajes de betão mantém-se constante ao longo da pista, sendo possível concluir que o coeficiente de atrito se mantém dentro dos parâmetros recomendados para a operação das aeronaves.

Os sistemas de juntas transversais foram também avaliados, tendo-se verificado a presença de ferrugem nos seus elementos metálicos, mantendo-se a funcionar corretamente. A junta, que separa o pavimento da pista da berma, apresenta a presença de vegetação que poderá contribuir para acelerar a degradação, assim como afetar negativamente o seu funcionamento. Contudo, foi possível compreender que este é um problema tratado regularmente pelos responsáveis pela manutenção. Quanto aos elementos de drenagem em betão, estes evidenciam sinais de degradação através da desagregação dos seus inertes, anomalia que poderá constituir um risco para as operações, visto poder constituir um potencial *Foreign Object Damage* (FOD) para as aeronaves a médio prazo.

As anomalias encontradas, e anteriormente descritas, são de baixa relevância, não necessitando da realização de planos de monitorização, tendo sido atribuído um índice de condição superficial dos pavimentos *Pavement Condition Index* (PCI) das pistas entre 90 e 100 - classificação dos pavimentos de Excelente [6].

3.3.2 Coeficiente de atrito

Para a avaliação deste parâmetro, a ANA utiliza o equipamento *Airport Surface Friction Tester* (ASFT), que permite obter resultados a uma velocidade de 65 e 95 km/h (Quadro 3.1) [4].

Quadro 3.1 - Valores limite de coeficiente de atrito **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**

	Pneu de medição	Velocidade de teste (km/h)	Lâmina de água (mm)	<i>Design level</i>	<i>Maintenance level</i>	<i>Minimum level</i>
ASFT	B 210	65	1	0,85	0,6	0,5
		95	1	0,74	0,47	0,34

Os ensaios foram, então, realizados nas seguintes condições ambientais: temperatura média do ar, variável entre 26 °C e 28 °C, e humidade relativa entre 37% e 40%.

A recolha de dados, através do ensaio anteriormente descrito, foi realizada às velocidades de 65 km/h e 95 km/h ao longo de 9 alinhamentos diferentes:

- eixo da pista;
- a 3m do eixo da pista (ambos os lados);
- a 5m do eixo da pista (ambos os lados);

- a 10m do eixo da pista (ambos os lados);
- a 5m da berma da pista (ambos os lados).

Após a recolha dos dados, relativos à velocidade de ensaio de 65 km/h, [4] foi possível concluir que, no alinhamento no eixo da pista, alguns valores do coeficiente de atrito obtidos são inferiores aos limites mínimos, quer do limite mínimo admissível (0,5), quer do limite mínimo de planeamento de medidas de manutenção (0,6). Nos alinhamentos a 3 m e a 10 m do eixo da pista, para ambos os lados, a grande maioria dos valores encontra-se abaixo dos 0,6, mas, apenas ocasionalmente, abaixo dos 0,5. No alinhamento a 5 metros do eixo da pista foi possível verificar que os valores obtidos são favoráveis e, na sua grande maioria, acima dos limite dos 0,6. A 5 m da berma encontrou-se o alinhamento com maiores problemas, com extensões superiores a 100 m, que não cumpriam o limite de 0,6 estabelecido.

3.3.3 Ensaio de carga com defletómetro de impacto

O ensaio de carga utilizando um defletómetro de impacto foi realizado ao longo de 7 alinhamentos da pista principal: um coincidente com o eixo da pista e os restantes a uma distância, paralela ao eixo, de 3 m, de 10 m e de 18,5 m para cada lado. Os pontos ensaiados, em cada alinhamento, distanciam 100 m entre eles.

Em cada ponto ensaiado foram realizados 3 impactos da 3ª altura de queda, que corresponde a forças de pico nominais de 150 kN. As deflexões medidas foram correspondentes aos 2 últimos impactos, recorrendo a sismógrafos apoiados em pontos da superfície do pavimento localizados a 0 (D₀), 0,30 (D₁), 0,45 (D₂), 0,60 (D₃), 0,90 (D₄), 1,20 (D₅), 1,80 m (D₆) do centro da zona sujeita ao impacto. Os resultados obtidos encontram-se representados no Quadro 3.2:

Quadro 3.2 - Zoneamento da pista principal [16]

Ponto		D0 (µm)	D1 (µm)	D2 (µm)	D3 (µm)	D4 (µm)	D5 (µm)	D6 (µm)
1P 0 a 2450 m; 3650 a 4000 m	Média	384	350	326	291	231	176	100
	Desvio Padrão	52	49	48	45	39	33	23
	Percentil 85	438	401	376	338	272	210	123
	Ponto Representativo	439	400	374	336	272	213	126
2P 2450 a 3650 m	Média	274	242	219	188	138	95	43
	Desvio Padrão	42	40	39	36	32	27	19
	Percentil 85	318	284	259	226	171	123	62
	Ponto Representativo	319	281	258	226	172	125	69

3.3.4 Avaliação do estado de tensão induzido por ação do pré-esforço

Para a realização do ensaio para avaliação do estado de tensão induzido por ação do pré-esforço, escolheram-se seis locais ao longo da pista principal, conforme apresentado no Quadro 3.3, a fim

de se proceder a uma análise representativa de toda a área a estudar. Sendo este ensaio de carácter destrutivo, os locais para a remoção de carotes situam-se em zonas menos críticas para a manobra das aeronaves, isto é, próximos do eixo da pista, realizando-se em zonas afastadas da passagem dos trens. Para a realização deste ensaio excluíram-se zonas próximas dos cruzamentos da pista com caminhos de circulação.

Quadro 3.3 - Identificação dos locais de ensaio [16]

Pista	Local	Distância ao topo Norte (m)	Distância ao eixo (m)
01L - 19R	1	142	20 E
	2	1.095	20D
	3	1.770	20 E
	4	24.550	20 D
	5	3.095	20 E
	6	3.860	20 D

De modo a reduzir ao mínimo os danos no pavimento, devido à remoção de carotes para os ensaios, a caracterização dos aços de pré-esforço foi realizada em apenas 4 dos 6 locais previamente identificados. No Quadro 3.4 e no Quadro 3.5, apresenta-se as características dos aços de pré-esforço longitudinal e transversal encontrados nos provetes:

Quadro 3.4 - Armaduras de pré-esforço longitudinal [16]

Local	Proвете	Área (mm ²)	Força (kN)	Tensão, σ (N/mm)	σ /Rm
1	1 L 1	39,2	37,8	964	0,61
	1 L 2	41,0	27,3	666	0,42
2	2 L 1	37,7	23,2	615	0,38
	2 L 2	39,3	27,9	710	0,45
5	5 L 1	41,4	26,6	642	0,40
	5 L 2	40,3	29,7	737	0,47
6	6 L 1	41,7	20,4	489	0,32
	6 L 2	41,1	34,2	832	0,54
Média			28,4		0,45

Com base nos resultados obtidos foi possível concluir que os aços de pré-esforço se encontram em boas condições de conservação, sem apresentar sinais de corrosão. As forças de pré-esforço longitudinal e transversal apresentam valores aproximados, com um valor médio de 30 kN, que corresponde a uma força de compressão no betão de 2.250kN/m².

Quadro 3.5 - Armaduras de pré-esforço transversal [16]

Local	Provete	Área (mm ²)	Força (kN)	Tensão, σ (N/mm)	σ / R_m
1	1 T 1	39,9			
	1 T 2	40,7	34,1	838	0,57
2	2 T 1	40,6	34,4	847	0,54
	2 T 2	39,5	34,2	866	0,54
5	5 T 1	41,7	32,0	767	0,54
	5 T 2	41,1	26,0	633	0,41
6	6 T 1	42,2	27,5	652	0,44
	6 T 2	42,0	26,1	621	0,41
Média			30,6		0,49

Nos ensaios SFJ para determinação de tensões na laje de betão, foram utilizadas almofadas circulares, de aço de paredes finas, com um raio de 30 cm e um valor de flecha de 10,5 cm.

As tensões, assim medidas, restringem-se à parte superficial da laje, mas julga-se ter sido esta a melhor opção tendo em consideração os danos que poderiam ter sido provocados por uma almofada de maiores dimensões, cuja abertura de rasgo iria inevitavelmente intersectar as armaduras.

Foram realizados 6 ensaios na pista principal como indicado no Quadro 3.6 e no Quadro 3.7. Cada ensaio consistiu na medição das tensões nas direções longitudinal e transversal das pistas.

Os resultados dos ensaios SFJ possuem alguma dispersão, como é possível observar no Quadro 3.6 e no Quadro 3.7, consultados em “Classificação ACN/PCN das Pistas da Base Aérea de Beja” (2003), tendo-se obtido valores médios da ordem de 4 MPa para as tensões longitudinais e 3,6 MPa para as tensões transversais. Note-se que estes valores não se afastam da ordem de grandeza dos valores esperados, tendo em atenção os resultados das tensões instaladas nas armaduras de pré-esforço. Atendendo que os ensaios foram efetuados em período diurno, ter-se-á temperaturas à superfície das lajes maiores que na sua base, o que implica que a parte inferior da laje de betão estará mais comprimida que a parte superior, por efeito do gradiente térmico.

Quadro 3.6 - Tensões de compressão no betão na direção longitudinal, medidas nos ensaios SFJ [16]

Local	σ betão (MPa)	Observações
1	4,60	Ensaio efetuado em período, com temperaturas do ar de 9 a 19°C
2	0,70	
3	4,40	
4	4,80	
5	5,40	
6	4,40	

Quadro 3.7 - Tensões de compressão no betão na direção transversal, medidas nos ensaios SFJ [16]

Local	σ betão (MPa)	Observações
1	2,70	Ensaio efetuado em período, com temperaturas do ar de 9 a 19°C
2	3,30	
3	3,40	
4	6,60	
5	1,93	
6	3,80	

No caso dos ensaios efetuados sobre as armaduras de pré-esforço, foi determinado um valor médio para as tensões de compressão devidas ao pré-esforço. No caso dos ensaios SFJ, atendendo à forma das almofadas utilizadas para aplicação de pressões, a avaliação incide no estado de tensão numa zona próxima da superfície, e que resulta da ação combinada do pré-esforço e das variações térmicas.

3.4 PCN

O sistema *Aircraft Classification Number* (ACN) / *Pavement Classification Number* (PCN) tem como objetivo efetuar uma classificação das aeronaves e da capacidade de carga dos pavimentos de aeroportos, respetivamente. Este sistema tem sido implementado pela ICAO desde 1980, e permite exprimir, através de um valor numérico, ACN, o efeito da solicitação da aeronave num pavimento.

O valor de ACN varia conforme a configuração do trem de aterragem, da carga por roda, pressão dos pneus, tipo de pavimento e resistência do solo de fundação. O PCN traduz a capacidade de carga de um pavimento em função da capacidade de carga máxima admissível que possa efetuar 10.000 recobrimentos.

A classificação de um pavimento em termos de PCN é feita através de um número (N) seguido de quatro letras que sintetizam a informação discriminada de seguida:

N - Valor numérico igual ao dobro da carga máxima admissível;

Tipo de pavimento:

R - Rígido;

F - Flexível.

Classe de resistência do solo de fundação:

A - Elevada (CBR superior a 13% ou módulo de reação vertical do solo (K) superior a 120 MN/m³);

B - Média (CBR entre 8 e 13% ou K entre 60 e 120 MN/m³);

C - Baixa (CBR entre 4 e 8% ou K entre 25 e 60 MN/m³);

D - Muito baixa (CBR inferior a 4% ou K inferior a 25 MN/m³).

Categoria da pressão de enchimento dos pneus:

W - Elevada (sem limite);

X - Média (limitada a 1,5 MPa);

Y - Baixa (limitada a 1,0 MPa);

Z - Muito baixa (limitada a 0,5 MPa).

Método utilizado para a determinação do PCN:

T - Analítico;

U - Empírico.

Para uma aeronave poder operar num pavimento, sem qualquer limitação, necessita que o valor de ACN associado à mesma seja igual ou inferior ao PCN do pavimento.

Considerando que em pavimentos pré-esforçados deve-se evitar a ocorrência de fendilhação, o cálculo da carga máxima admissível foi realizado para a combinação de ações no pavimento mais desfavorável, tendo como base os valores expostos no capítulo 3.3. Assim, tomou-se em consideração os seguintes valores:

- tensão de compressão devido ao pré-esforço: -2,25 MPa;
- tensão de tração devido ao arrefecimento da laje: 1,0 MPa;
- tensão de tração devido ao gradiente térmico na laje: 1,4 MPa.

Deste modo, foi possível determinar a tensão máxima admissível de 4,65 MPa, que corresponde a uma carga máxima vertical de 222 kN, o equivalente a um PCN de 45, sendo a classificação do pavimento da BA11 ACN/PCN 45/R/B/W/T [4].

O rácio ACN/PCN de forma a validar as condições estruturais do pavimento que permita as movimentações de uma certa aeronave deve ser inferior a 1,1, isto é, o ACN da aeronave que vai utilizar o pavimento de uma determinada pista deve ser até 1,1 vezes o valor do PCN do pavimento, determinado para a aeronave crítica. Tudo o que seja superior a esse valor, embora possa não ser impeditivo, implica o controlo de movimentações e a tomada de medidas de avaliação e controlo de estado após as mesmas.

Neste âmbito, e com o objetivo de avaliar a necessidade de aplicação de um reforço estrutural no pavimento com a intenção de movimentar a aeronave airbus A380-800 de forma constante, realizou-se uma análise empírica da condição atual da estrutura. Para este estudo recorreu-se ao software PCASE, que permite determinar a espessura mínima necessária das camadas de um

pavimento de forma a que seja possível responder a um determinado tráfego aéreo, assim como determinar o seu PCN. Admitindo-se um número de movimentos de uma aeronave com um ACN inferior a 45, conforme Figura 3.1. O número de movimentações considerado foi obtido, iterativamente, até que o dimensionamento das dimensões da camada de betão da laje equivalente fosse de 22cm, conforme Figura 3.2, ou seja a dimensão da laje equivalente atual, e um PCN próximo de 45, Figura 3.3, obtendo assim uma estrutura próxima da real.

Vehicle	Weight (lb)	Passes
BOEING 737-800	148070	290

Figura 3.1 - Movimentações empíricas do Boeing 737-800

TESTE		Layers			Layer Strengths	
Layer Type	Material Type	Flexural Strength (MPa)	Analyze	Non-Frost Design Thickness (mm)	K (kPa/mm)	
PCC	N/A	4,50	Compute	220	0,00	
Stabilized Base	PCC	0,00	Manual	152	0,00	
Natural Subgrade	Cohesive Cut	0,00	N/A	0	60,00	

Figura 3.2 - Dimensionamento da camada de betão

The screenshot shows the 'Layer Manager' window of the APE/CBR Analysis software. It includes a 'Build Structures' table with columns for Layer Type, Material Type, Frost, Thick (in), K (pci), and Flex Str (psi). The table lists three layers: PCC, Stab Base, and Natural Subgrad. Below the table are controls for 'Layer Set Controls' (Edit, Save, Canc, Add, Del, Copy), 'Pavement Type' (Rigid), 'PCC Crit' (Stress), 'Eff K' (?), 'Rigid Criteria' (First Crack), and 'Commands' (Run Analysis). The 'Current Vehicle' is set to 'BOEING 737-800' with an 'ACN/PCN' of 1,1. The 'Results' section shows a table with columns for Time, Design, ACN, PCN, Allowable(Kips) Load, and Passes. The results for 'Jan-Dec' show 290 Design Passes, 45 ACN, 41/R/D/W/T PCN, 137,1 Allowable(Kips) Load, and 175 Passes.

Layer Type	Material Type	Frost	Thick (in)	K (pci)	Flex Str (psi)
PCC			8,68		653
Stab Base	PCC Stab-GW/GP		6,00		
Natural Subgrad	Cohesive Cut	F0		221	

Time	Design	ACN	PCN	Allowable(Kips) Load	Passes
Jan-Dec	290	45	41/R/D/W/T	137,1	175

Figura 3.3 - PCN do pavimento

Para a situação atual, utilizou-se as curvas ACN do Airbus A380-800 (Figura 3.4), para verificar se seria possível realizar movimentações desta aeronave, ainda que não fosse a aeronave crítica. Dessas curvas, verificou-se que o valor de ACN mais baixo é de 68, para condições de pavimento semelhantes às existentes e carga mínima na aeronave, um valor 1,5 vezes superior ao PCN, encontrando-se, assim, acima do limite admissível.

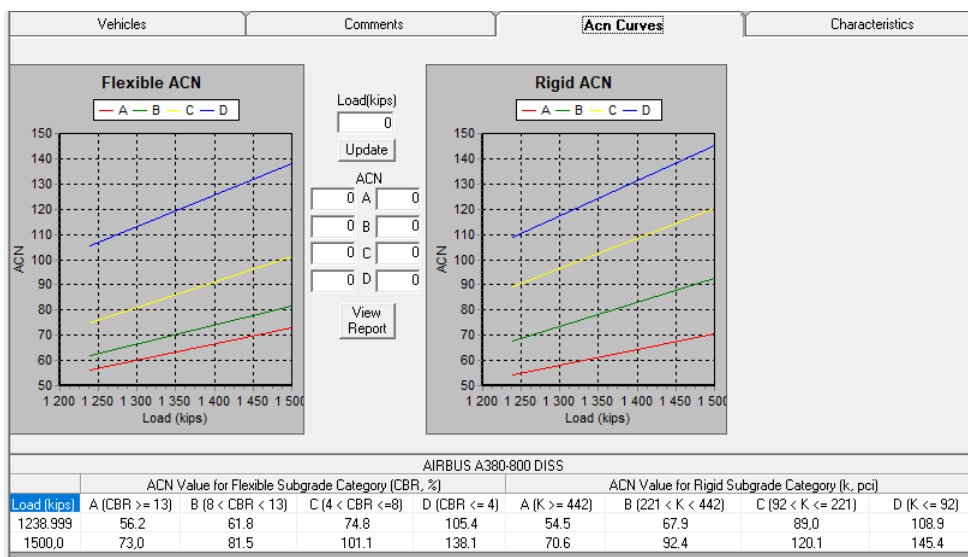


Figura 3.4 - Curvas ACN do Airbus A380-800

Recorrendo a estrutura empírica anteriormente referida, com um tráfego que tende a simular o tráfego real, no que diz respeito a esforços introduzidos no pavimento, realizou-se uma análise ao número de movimentações que seria necessário gerar pela aeronave Airbus A380-800, para que esta passasse a ser considerada a aeronave crítica (Figura 3.5). Concomitantemente, procurou-se

obter o valor do PCN associado a esta condição (Figura 3.6), visto que este se relaciona com as características do trem da aeronave crítica e com o peso da mesma.

BA11_ORIG

Analysis Type: Mixed Design Type: Airfield English

Standard Patterns: Edit Standard Patterns Choose Standard Pattern

Vehicle	Weight (lb)		Passes	
	Areas A, B	Areas C, D	Areas A, B, C	Area D
BOEING 737-800	148070	111052	290	3
AIRBUS A380-800 DISS	1238999	929249,25	75	1

Figura 3.5 - Padrão de tráfego dimensionado

Run Properties Layer Manager Edit Settings

Build Structures

Layer Type	Material Type	Frost	Thick (in)	K (pci)	Flex Str (psi)
PCC			8,68		653
Stab Base	PCC Stab-GW,GP,		6,00		
Natural Subgrad	Cohesive Cut	F0		221	

Layer Set Controls - 3 of 3

Edit Save Cancel Add Del Copy

Pavement Type: Rigid PCC Crit: Stress

Eff K: ? Rigid Criteria: First Crack ?

Commands: Run Analysis

Current Vehicle: AIRBUS A380-800 DISS ACN/PCN: 1,5

Results:

Time	Design Passes	ACN	PCN	Allowable(Kips) Load	Passes
Jan-Dec	146	89	61/R/D/W/T	1007,5	48

Welcome to APE/CBR Analysis.

< --- Step 1: Click the button on this row called "Edit" and build your layers.

< --- Step 2: Click the button on this row called "Run Analysis". View your results below.

Figura 3.6 - PCN para condições existentes

Foi possível verificar que, após 75 movimentos do A380-800, em 20 anos, menos de 4 movimentos por ano, esta passaria a ser considerada a aeronave crítica. Com este número de movimentos calculou-se o novo PCN do pavimento, tendo-se obtido 61/R/D/W/T, ou seja, inferior ao ACN de 89 do A380-800 para a carga mínima. Deste modo, justificou-se a necessidade de aplicação de um reforço estrutural para tornar possível movimentações mais constantes da aeronave A380-800.

3.5 Conclusões

Neste capítulo, apresentou-se a caracterização do pavimento da BA11, assim como, as metodologias aplicadas no seu dimensionamento e escolha de materiais, processos construtivos e anomalias passíveis de serem identificadas.

No que diz respeito ao dimensionamento da pista, foi possível concluir que o método aplicado na sua conceção, para um pavimento rígido com recurso a pré-esforço, conforme se vinha realizando na Alemanha, foi relevante, na medida em que nunca havia sido aplicado naquelas proporções.

Tendo sido atribuída a aeronave crítica para a missão inerente à BA11, o B36 da Convair (USA), todo o dimensionamento estrutural foi realizado com recurso aos gráficos desenvolvidos pela CEEU. Com a construção do pavimento com recurso a pré-esforço foi possível reduzir as dimensões de espessura das lajes de betão, tornando a construção economicamente mais viável.

O método de aplicação do pré-esforço adotado foi o processo do leito lento, em que o aço é pré-esforçado, antes da colocação do betão. A betonagem do betão foi realizada em faixas com 7,5m de largura, tendo as lajes dimensões na ordem dos 670 m, o que só foi possível devido ao pré-esforço.

Relativamente aos ensaios estudados, foram analisadas inspeções visuais previamente realizadas, relativamente ao coeficiente de atrito, ensaio de carga através do defletómetro de impacto e de avaliação do estado de tensão induzido nas lajes devido ao pré-esforço. A partir da análise dos valores obtidos, foi possível determinar os locais do pavimento mais afetados, quer na superfície de rolagem, através do ensaio de atrito, quer estruturalmente, através da capacidade resistente de carga, pelo ensaio FWD, e estado do pré-esforço, através da avaliação realizada aos cabos [5] [4] [6] [16] **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**].

Foi realizado, também, uma análise empírica para as condições atualmente existentes no pavimento. Para esta análise dimensionou-se um tráfego empírico que exigisse uma camada superficial em betão com as mesmas dimensões da laje equivalente para o betão pré-esforçado, que existe no pavimento da BA11. Seguidamente foi verificado que quando a aeronave A380-800 passou a ser considerada aeronave crítica, para as condições atuais do pavimento, este não tem condições estruturais suficientes para suportar os movimentos desta aeronave, comprovando a necessidade de aplicação de um reforço a nível estrutural.

4. Dimensionamento de reforço estrutural

4.1 Considerações iniciais

De modo a que a aeronave A380 possa operar na pista do aeroporto de Beja, sem limitações, existe a necessidade de efetuar o reforço do pavimento aeronáutico da pista.

Um pavimento como o da pista do aeroporto de Beja, já descrito, não se reforça em betão de cimento. Para ser em betão de cimento, teria de se considerar a reconstrução, o que não faria sentido atendendo à reserva de resistência que ainda tem, apesar da idade.

Admitiu-se, assim, a utilização dum SMA, mistura betuminosa que devido à sua granulometria assegura uma boa resistência a tensões verticais elevadas, como será o caso das induzidas pelo A380. O SMA é composto por uma distribuição granulométrica com uma elevada percentagem de agregados de maiores dimensões, com 70 a 80% do material retido no peneiro 10 (2mm). Devido à granulometria do material utilizado existe um elevado volume de vazios que é preenchido por mástique betuminoso que é composto pela fração de areia, filler, e que é rico em ligante betuminoso (6% ou mais). Também se podem juntar fibras celulósicas granulares (cerca de 0,3% em peso total da mistura) que asseguram a proteção à drenagem do ligante para fora da mistura.

Devido às características de constituição do SMA, este reúne os seguintes atributos [17]:

- maior tempo de vida útil quando comparado a misturas betuminosas densas contínuas;
- maior aderência do pneu ao pavimento devido à sua granulometria descontínua, que proporciona uma textura superficial que retém a água da chuva, removendo-a da superfície do pavimento;
- redução do reflexo das luzes melhorando a visibilidade noturna;
- redução do ruído provocado pela movimentação das aeronaves no pavimento devido à textura do SMA.

Para o dimensionamento da camada de reforço foi necessário determinar qual o valor do módulo de rigidez e da resistência à tração das misturas de SMA a estudar. Para este tipo de material, estes valores dependem da sua constituição, quer pelo material granular utilizado na mistura, quer pela percentagem de mástique aplicada para preenchimento dos vazios. Assim, considerou-se as misturas com as características apresentadas no Quadro 4.1 [18] e no

Quadro 4.2, resultados provenientes de estudo realizado no Laboratório de Vias de Comunicação e Transportes (LVCT) do Instituto Superior Técnico (IST), que se encontram demonstradas graficamente na Figura 4.1:

Quadro 4.1 - Distribuição granulométrica dos agregados [18]

Peneiro	Abertura (mm)	Granulometria SMA (mm)			
		12,5 mm (I)	12,5 mm (II)	12,5 mm (III)	9,5 mm
3/4"	19	100	100	100	100
1/2"	12,5	95	95	95	100
3,8"	9,5	75	75	75	95
Nº 4	4,75	22	27	35	43
Nº 10	2	16	17	18	22
Nº 40	0,42	13	13	13	15
Nº 80	0,18	12	12	12	13
Nº 200	0,075	10	10	10	10

Quadro 4.2 - Distribuição granulométrica dos agregados (estudo realizado no LVCT do IST)

Abertura (mm)	Granulometria SMA (mm)
	16 mm
22	100
16	100
11,2	67,4
8	45
4	26
2	20,7
0,5	13,7
0,063	7,6

Os ensaios de cargas repetidas, como o ensaio de tração uniaxial, ensaio de compressão uniaxial, ensaio de viga à flexão, ensaio de tração por compressão diametral e ensaio de compressão triaxial, realizados aos SMA, de diferentes constituições, para determinação do módulo de rigidez, R, e de resistência à tração permitiram a obtenção dos valores apresentados no Quadro 4.3. Estes valores, dependem do teor de ligante, da utilização ou não de fibras na sua constituição, e do tamanho máximo nominal (TMN), que caracterizam as várias misturas de SMA.

Quadro 4.3 - Caracterização dos SMA [18]

Tipo de Compactação	Misturas SMA				
	9,5 mm	12,5 mm (I)	12,5 mm (II)	12,5 mm (III)	16 mm
Módulo de Rigidez (MPa)	3351	4821	3745	3790	6000
Resistência à tração (MPa)	1,17	0,87	1,10	1,11	-----
Teor de ligante (%)	6,80	7,70	6,80	7,20	6,00

O módulo de rigidez, valor que apresenta maior influência na determinação da espessura da camada de reforço a aplicar, foi determinado com base no ensaio de flexão em 4 pontos. Este ensaio encontra-se estipulado na norma europeia EN 12697-24 e consiste na medição da resposta a cargas aplicadas segundo um determinado espectro de frequências nominais.

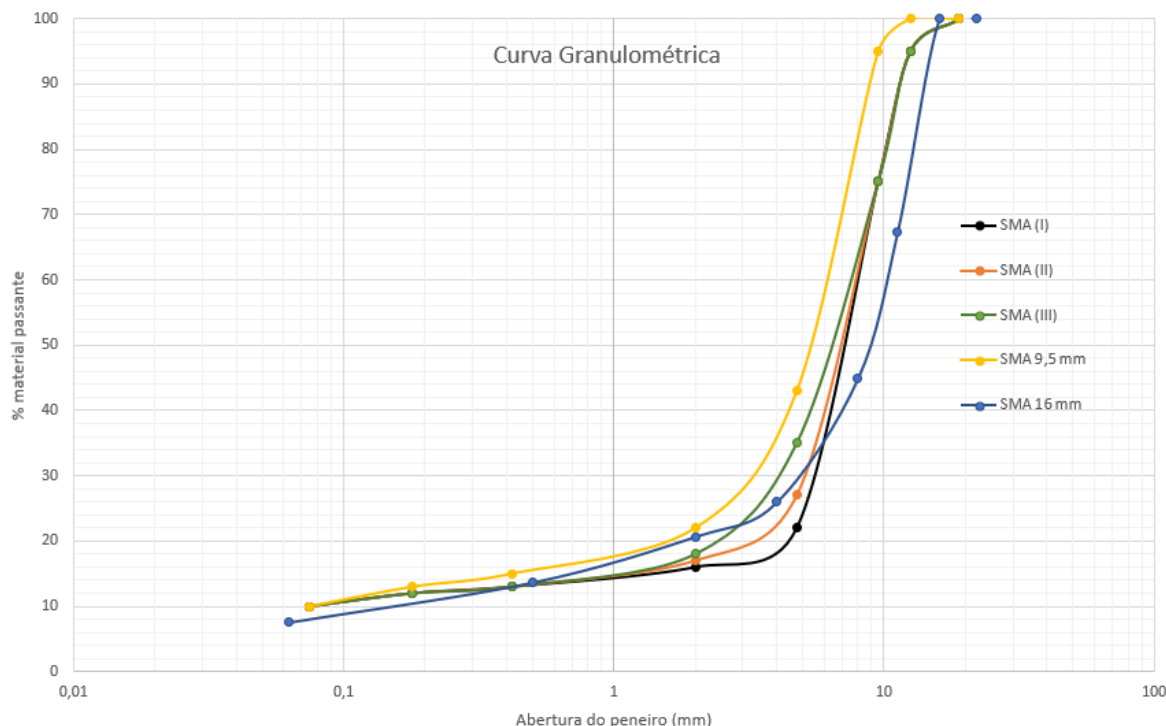


Figura 4.1 - Curva granulométrica das várias misturas SMA

É possível observar, a partir do Quadro 4.2, que para a mistura com TMN de granulometria de 16 mm o módulo de rigidez é superior ao das misturas com TMN de 12,5 mm e de 9,5 mm. Quanto à resistência à tração, a evolução é inversa, sendo que esta aumenta com a redução do TMN. Para a mistura com TMN de 16 mm com fibras não são apresentados valores de ensaios para a determinação da resistência à tração. No entanto, é importante destacar que, para as três misturas com TMN de 12,5 mm, o módulo de rigidez aumenta com o aumento da percentagem de mástique aplicado, contrariando a tendência literária, que constata que o módulo de rigidez tende a diminuir com o aumento do teor de ligante, visto este funcionar como um lubrificante [18].

Relativamente à estrutura existente, o software de dimensionamento não contempla a possibilidade de um pavimento rígido pré-esforçado. Assim, foi definida uma laje equivalente à

existente, isto é, uma laje com a mesma capacidade resistente, mas sem o pré-esforço, variando-se, para isso, a espessura da mesma.

De forma a determinar a espessura da laje equivalente, foi necessário igualar o PCN à da laje existente com pré-esforço. Para a carga por roda simples de 222 kN, determinada no capítulo 3.4, atuando com a pressão de 1,25 MPa, a efetuar 10.000 recobrimentos num betão com resistência à flexão de 4,50 MPa, obteve-se uma tensão de tração máxima admissível de 2,75 MPa. Com estes dados obteve-se uma espessura da laje equivalente de 220 mm, com um módulo de deformabilidade 27.579 MPa [4].

Para as camadas inferiores utilizou-se os valores de dimensionamento determinados por Antunes (2003) recorrendo ao software BISAR 3.0: R de 6.000 MPa para a camada base em solo cimento, com uma espessura de 17 cm, e 183,56 MPa para a sub-base [16].

4.2 Modelação e dimensionamento

O software de dimensionamento FAARFIELD realiza o dimensionamento com base nas características do pavimento e das aeronaves, associando-se a quantidade de movimentos respetiva. Assim, de modo a determinar o reforço compatível com o novo uso do aeródromo, foi necessário proceder a uma previsão do que poderia ocorrer, de acordo com as solicitações da aeronave A380, às quais se associou o número de movimentos, adicionando-se uma quantidade de aeronaves, por via de sua deslocação dos aeroportos circundantes, de Lisboa e de Faro, para o aeroporto de Beja. Para realizar esta previsão foi necessário fazer várias considerações.

Inicialmente, realizou-se um estudo a nível de movimentações aeronáuticas nacionais, número total de aeronaves que, por ano, aterram ou descolam nos aeroportos do continente, assim como verificar qual a sua evolução ao longo dos anos, conforme apresentado no Quadro 4.4.

Quadro 4.4 - N.º de movimentações de aeronaves nos principais aeroportos em Portugal continental [19] [20]
[21] [22]

	2013	2014	2015	2016	2017
Lisboa	142.333	152.335	162.042	178.639	199.262
Porto	58.384	62.165	69.377	77.361	85.263
Faro	41.410	42.402	43.096	51.330	57.473
Beja	69	81	38	34	42
Total	242.196	256.983	274.553	307.364	342.040

Seguidamente, foi necessário estabelecer quais as principais companhias aéreas a utilizar os vários aeroportos, de forma a estabelecer o número de movimentos por aeronave por ano.

Considerou-se que, para cada companhia, existe uma aeronave condicionante e todas as movimentações existentes da empresa seriam realizadas por essa aeronave.

Considerando que, com um aumento da capacidade resistente do pavimento, e maior disponibilidade para aeronaves mais exigentes, pode existir uma deslocação das aeronaves dos aeroportos de Lisboa e de Faro para Beja, aliviando a sobrecarga de utilização a que o aeroporto de Lisboa, neste momento, se encontra sujeito. Para este estudo, considerou-se que 5% das aeronaves que atualmente utilizam os aeroportos de Lisboa e de Faro passariam para Beja.

Neste cenário, o aeroporto de Beja passa para um total de movimentos, no primeiro ano, de 25.715 aeronaves civis e de 3.197 aeronaves militares. Atendendo a que a nível civil se verificou um aumento aproximado de 5% no número de voos por ano, utilizou-se essa taxa de crescimento anual para o dimensionamento, a fim de se estipular um reforço que assegurasse 20 anos de vida útil.

Relativamente à aeronave A380, visto esta atualmente não utilizar os aeroportos nacionais, foi necessário considerar um número de movimentos anuais. Assim, admitiu-se 24 movimentos por ano, 5 por mês, nos meses de junho, julho e agosto, e 1 por mês nos restantes meses (9), incluindo a taxa de crescimento anual de 5% como anteriormente referido. Note-se que, em 2018, existiam 169 aeronaves A380 em 11 companhias aéreas, prevendo-se chegar a curto/médio prazo a 317, valor correspondente ao número total de pedidos de fabrico. Neste momento, o voo mais curto desta aeronave é de cerca de 800 km, pelo que, a partir de Beja, existem diversos destinos possíveis com distâncias superiores. Por outro lado, o A380 é operado por algumas companhias europeias, como a *Hi Fly*, *Air France*, *Lufthansa* e *British Airways* [23] [24] [25] [26].

A partir da análise dos Boletins Estatísticos Trimestrais de 2017 (Anexo A), desenvolvidos pela ANAC, foi possível extrapolar uma aproximação à utilização a que o pavimento da pista da BA11 estaria sujeito, tendo em consideração as assunções anteriormente referidas, tendo-se obtido o disposto no Quadro 4.5.

Quadro 4.5 - Tráfego das principais companhias aéreas a voar em Portugal e aeronave condicionante [1]

Companhia Aérea	Nº de movimentações anuais	Aeronave condicionante
TAP - Portugal	114516	A321
Ryanair, Ltd.	32054	B737-800
Easyjet Airline Company Limited	24426	A320
Jet2.com (Channel Express)	2663	B757-200
Vueling Airlines, S.A.	4036	A320
Deutsche Lufthansa Ag.	4036	A321
Transavia France	2748	B737-800
SATA Internacional, S.A.	2498	A320
Transavia Airlines, Cv.	3758	B737-800
Monarch Airlines Ltd	1853	A321
Air France	3191	A320
IBERIA L.A.E. S.A. OPERADORA	513	A330
Air Europa Líneas Aéreas, S.A.U.	3183	B737-800
Aer Lingus, Plc.	2997	A321
British Airways, Plc.	4180	A320
Niki Luftfahrt, Gmbh	202	A321
Thomsonfly	135	B757-300
Air france	135	A320
Eurowings GmbH	2347	B737-800
Air Berlin PLC & Co. Luftverkehrs KG	571	B737-800
TUIfly GmbH	558	B737-800
Flybe Limited	297	B737-100

Dado que o aeroporto de Beja se encontra partilhado com a BA11, utilizando, quer a componente civil quer a militar, foi necessário avaliar as movimentações anuais das aeronaves militares. Para esse efeito considerou-se os valores apresentados no Quadro 4.6, extrapolados da dissertação de Arnaldo [4].

Quadro 4.6 - Tráfego militar [4]

Aeronave	Total de descolagens (2005-2010)	Média Anual
A124	8	2
A319	130,5	26
A320	49	10
AMX	6	1
B747	3,5	1
C130	18,5	4
C160	121	24
F16	38	8
P3	1450	290
TORNADO	22	4
A310	14	3
C17	4	1
E3TF	53	11
IL76	10	2
Total	15976	3197

Assim, recorrendo ao software de dimensionamento FAARFIELD, e inserindo toda a informação considerada, obteve-se a espessura da camada de reforço a aplicar, em função de cada uma das misturas de SMA especificadas. Contudo, o dimensionamento efetuado pelo software apresenta algumas limitações, como o facto de não incluir a possibilidade de caracterização completa deste tipo de material, o que limita uma completa caracterização da capacidade resistente que o pavimento pode oferecer.

Para o SMA com o TMN de 9,5mm, foi possível determinar que, para o tempo de vida útil de 20 anos, seria necessário uma espessura de reforço no valor de 394 mm, como se verifica na Figura 4.2.

FAARFIELD - Modify and Design Section SMA95 in Job 01

Section Names

- AConRigid01
- SMA475
- SMA95**
- SMAI
- SMAII
- SMAIII

Design Stopped 1405,11;

Airplane

01 SMA95 Des. Life = 20 SCI = 85 %CDFU = 100

Layer Material	Thickness (mm)	Modulus or R (MPa)
Undefined	393,7	3 351,00
PCC Surface	220,0	4,50
Undefined	170,0	6 000,00

Non-Standard Structure

Subgrade	k = 60,0	183,56
----------	----------	--------

N = 3; Str Life = 20,3 yrs; t = 783,7 mm

Back Help Life Modify Structure Design Structure Save Structure

Figura 4.2 - Espessura SMA com TMN 9,5mm

Para o SMA com o TMN de 12,5mm (I) determinou-se que, para o tempo de vida útil de 20 anos, a espessura necessária de reforço a aplicar seria de 365 mm, como se verifica na Figura 4.3.

FAARFIELD - Modify and Design Section SMAI in Job 01

Section Names

- AConRigid01
- SMA475
- SMA95
- SMAI**
- SMAII
- SMAIII

Design Stopped 1430,22;

Airplane

01 SMAI Des. Life = 20 SCI = 85 %CDFU = 100

Layer Material	Thickness (mm)	Modulus or R (MPa)
Undefined	365,3	4 821,00
PCC Surface	220,0	4,50
Undefined	170,0	6 000,00

Non-Standard Structure

Subgrade	k = 60,0	183,56
----------	----------	--------

N = 3; Str Life = 20,4 yrs; t = 755,3 mm

Back Help Life Modify Structure Design Structure Save Structure

Figura 4.3 - Espessura SMA com TMN 12,5mm (I)

Para o SMA com o TMN de 12,5mm (II) determinou-se que, para o tempo de vida útil de 20 anos, requer-se uma espessura de reforço no valor de 385 mm, como se verifica na Figura 4.4,

FAARFIELD - Modify and Design Section SMAII in Job 01

Section Names: AConRigid01, SMA475, SMA95, SMAI, **SMAII**, SMAIII

Design Stopped 1858.97;

01 SMAII Des. Life = 20 SCI = 85 %CDFU = 100

Layer Material	Thickness (mm)	Modulus or R (MPa)
Undefined	384.5	3745.00
Non-Standard Structure		
PCC Surface	220.0	4.50
Undefined	170.0	6000.00
Subgrade	k = 60.0	183.56

N = 4; Str Life = 20.0 yrs; t = 774.5 mm

Buttons: Back, Help, Life, Modify Structure, Design Structure, Save Structure

Figura 4.4 - Espessura SMA com TMN 12,5mm (II)

Para o SMA com o TMN de 12,5mm (III) determinou-se que, para o tempo de vida útil de 20 anos, seria necessário uma espessura de reforço no valor de 384 mm, como se verifica na Figura 4.5.

FAARFIELD - Modify and Design Section SMAIII in Job 01

Section Names: AConRigid01, SMA475, SMA95, SMAI, SMAII, **SMAIII**

Design Stopped 1818.85;

01 SMAIII Des. Life = 20 SCI = 85 %CDFU = 100

Layer Material	Thickness (mm)	Modulus or R (MPa)
Undefined	383.6	3790.00
Non-Standard Structure		
PCC Surface	220.0	4.50
Undefined	170.0	6000.00
Subgrade	k = 60.0	183.56

N = 4; Str Life = 20.0 yrs; t = 773.6 mm

Buttons: Back, Help, Life, Modify Structure, Design Structure, Save Structure

Figura 4.5 - Espessura SMA com TMN 12,5mm (III)

Para o SMA com o TMN de 16 mm determinou-se que, para o tempo de vida útil de 20 anos, dever-se-ia aplicar uma espessura de reforço no valor de 342 mm, como se verifica na Figura 4.6.

Figura 4.6 - Espessura SMA com TMN 16mm

Para as cinco análises realizadas obteve-se, então, as espessuras apresentadas no Quadro 4.7:

Quadro 4.7 - Espessura de reforço a aplicar

Mistura SMA	Espessura Dimensionada	Espessura admitida
SMA com TMN 9,5mm	393,7 mm	395 mm
SMA com TMN 12,5mm (I)	365,3 mm	365 mm
SMA com TMN 12,5mm (II)	384,5 mm	385 mm
SMA com TMN 12,5mm (III)	383,6 mm	385 mm
SMA com TMN 16mm	341,5 mm	340 mm

Para as cinco diferentes espessuras dimensionadas considerou-se que adotar-se-ia as espessuras de: 395 mm para a camada de reforço em SMA com TMN de 9,5 mm; 385 mm para a camada SMA com TMN de 12,5 mm (II) e (III), devido à sua proximidade de espessura de reforço determinada; para a camada em SMA com TMN de 12,5 mm (I) considerou-se a espessura de 365mm; e, por último, a espessura da camada de reforço em SMA com TMN 16 mm considerou-se o valor de 340 mm.

Assim, para o cálculo do PCN através do software PCASE, considerou-se apenas dimensões de reforço de 365 mm, 385 mm e 340 mm, valores consistentes com os módulos de rigidez associados.

Excluiu-se a possibilidade de reforço com o SMA com TMN de 9,5 mm, visto se ter obtido uma espessura de reforço de 395 mm, o que tende a ser elevada para dimensões capacidade

resistente do agregado da mistura devido ao seu esqueleto de reduzidas dimensões, o que poderia vir a tornar-se prejudicial para o correto funcionamento do pavimento.

Com as várias espessuras obtidas, pretendeu-se determinar o PCN do pavimento para o tráfego aplicado. Para tal, recorreu-se ao software PCASE, que permite analisar para os movimentos a que pavimento se encontra sujeito, ao longo dos 20 anos, o valor ACN da aeronave crítica, assim como estabelecer o PCN correspondente para o pavimento.

O valor do PCN não é fixo, e varia em função das características do pavimento e da aeronave crítica em combinação com o número de movimentos. Contudo, não foi possível, devido a limitações do software, combinar com as espessuras determinadas, as características mecânicas de cada camada da estrutura de pavimento. Assim, considerou-se, apenas, as variações de espessura determinadas anteriormente.

A aeronave crítica determinada pelo software de dimensionamento PCASE foi o A330-200, como apresentado na Figura 4.7.

The screenshot displays the PCASE software interface for traffic dimensioning. At the top, it shows 'Vehicles' and 'Show Mixed Traffic / ACNPCN'. Below this, there are input fields for 'PAV_BA11', 'Pavement Type' (Flexible), 'Subgrade Category' (Cat A), and 'Traffic Area' (Area A). A table lists various aircraft types with their weights and equivalent passes. At the bottom, another table defines subgrade categories (A, B, C, D) based on CBR and K values, and maps them to traffic descriptions (A, B, C, D). Buttons for 'ACN / PCN', 'Print', and 'Exit' are visible on the right.

Vehicle	Weight (lb)		Passes		Equivalent Passes
	Areas A, B	Areas C, D	Areas A, B, C	Area D	
AIRBUS A319-100	166800	125100	580	6	1
AIRBUS A320-200	149911	112433	535869	53589	1
AIRBUS A330-200	509039	381779	16963	170	16963
AIRBUS A380-800 DISS	1272067	954050	794	8	1516
AN-124 RUSSIAN	864210	648158	40	1	1
BOEING 737-100	82500	61875	9821	98	1
AIRBUS A330-200	509039	381779			18934

Subgrade Category	Flexible (CBR,%)	Rigid (k,pci)	Traffic	Description
A	CBR >= 13	K >= 442	A	Taxiways & Runway Ends
B	8 < CBR < 13	221 < K < 442	B	Aprons
C	4 < CBR <= 8	92 < K <= 221	C	Runway Interiors
D	CBR <= 4	K <= 92	D	Runway Edges

Figura 4.7 - Padrão de tráfego dimensionado

Para a aeronave A330-200 com um número de movimentações equivalentes no valor de 18.934, e um reforço em SMA com TMN 12,5 mm (II) e (III) com espessura de 385 mm obteve-se um PCN de 73, conforme Figura 4.8.

Current Section: 01 1 19/04/2003

Run Properties Layer Manager Edit Settings

Build Structures

Layer Type	Material Type	Frost	Thick (in)	K (pci)	Flex Str (psi)
AC Overlay			15,10		
PCC Base Slab			8,66		653
Stab Base	PCC Stab-GW/GP,		6,69		
Natural Subgrad	Cohesive Cut	F0		221	

Layer Set Controls - 2 of 2

Edit Save Cancel Add Del Copy

Pavement Type: Rigid PCC Crit: Stress

Eff K: ? Rigid Criteria: Shattered Slab ?

Commands

Run Analysis

Current Vehicle

AIRBUS A330-200 ACN/PCN 1,0

Results

Time	Design	ACN	PCN	Allowable(Kips)
	Passes			Load Passes
Jan-Dec	18934	72	73/R/D/W/T	513,9 20440

Welcome to APE/CBR Analysis.

< --- Step 1: Click the button on this row called "Edit" and build your layers.

< --- Step 2: Click the button on this row called "Run Analysis". View your results below.

Figura 4.8 - PCN para reforço em SMA com TMN 12,5 mm (II) e 12,5 mm (III)

O PCN obtido para a aeronave A330-200 com um número de movimentações equivalentes de 18.934, e um reforço em SMA com TMN 12,5 mm (I), com uma espessura no valor de 365 mm, foi de 70, conforme Figura 4.9.

Current Section: 01 1 19/04/2003

Run Properties Layer Manager Edit Settings

Build Structures

Layer Type	Material Type	Frost	Thick (in)	K (pci)	Flex Str (psi)
AC Overlay			14,37		
PCC Base Slab			8,66		653
Stab Base	PCC Stab-GW/GP,		6,69		
Natural Subgrad	Cohesive Cut	F0		221	

Layer Set Controls - 2 of 2

Edit Save Cancel Add Del Copy

Pavement Type: Rigid PCC Crit: Stress

Eff K: ? Rigid Criteria: Shattered Slab ?

Commands

Run Analysis

Current Vehicle

AIRBUS A330-200 ACN/PCN 1,0

Results

Time	Design	ACN	PCN	Allowable(Kips)
	Passes			Load Passes
Jan-Dec	18934	72	70/R/D/W/T	495,1 15196

Welcome to APE/CBR Analysis.

< --- Step 1: Click the button on this row called "Edit" and build your layers.

< --- Step 2: Click the button on this row called "Run Analysis". View your results below.

Figura 4.9 - PCN para reforço em SMA com TMN 12,5 mm (I)

Para a aeronave A330-200 com um número de movimentações equivalentes de 18.934, e um reforço em SMA com TMN 16 mm, com espessura de 395mm, o PCN calculado foi de 66, conforme Figura 4.10.

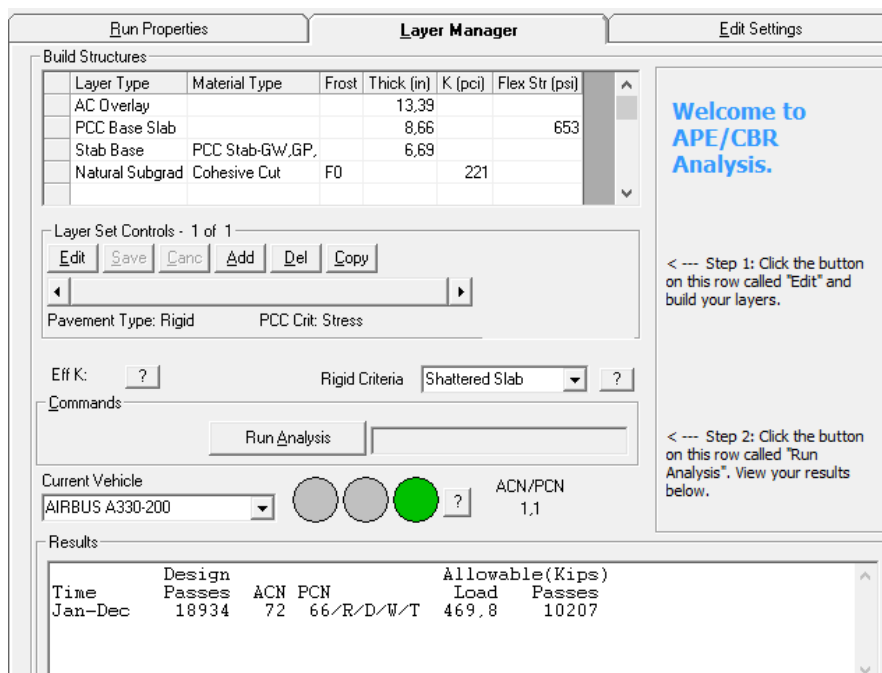


Figura 4.10 - PCN para reforço em SMA com TMN de 16 mm

Neste caso de estudo, o software determinou, para a aeronave crítica Airbus A330-200, com um número de passagens de 18.934 ao longo de 20 anos, um PCN de 73/R/D/W/T, 70/R/D/W/T e 66/R/D/W/T para as misturas com TMN 12,5 mm (II) e 12,5 mm (III), TMN 12,5 mm (I) e TMN 16 mm, respetivamente, conforme se apresenta no Quadro 4.8.

Atente-se que, conforme referido, o software PCASE não tem em consideração o aumento do módulo de rigidez dos vários SMA, recorrendo a um valor pré-definido, considerando, apenas, a sua espessura. Por esse motivo, o PCN obtido é menor para as camadas com maior módulo de rigidez e, consequentemente, menor espessura.

Quadro 4.8 - PCN calculado para as diferentes misturas e espessuras

Misturas de SMA	PCN calculado
TMN 12,5 mm (II) e 12,5 mm (III) (385mm)	73/R/D/W/T
TMN 12,5 mm (I) (365 mm)	70/R/D/W/T
TMN 16 mm (I) (340 mm)	66/R/D/W/T

Visto o objetivo desta dissertação surgir por necessidade de operar a aeronave Airbus A380-800 na pista da BA11, com reforço estrutural em SMA, realizou-se novos cálculos de PCN do pavimento, para esta nova condição. Para tal, aumentou-se, de forma iterativa, o número total de movimentos da aeronave Airbus A380-800, ao longo dos 20 anos de vida útil, até que esta fosse considerada a aeronave condicionante. Para atingir este resultado, foi necessário considerar 9.000 movimentos ao

longo dos 20 anos de vida útil, tempo utilizado para o dimensionamento, do A380-800 na pista de Beja. Com este novo valor de tráfego, recalculou-se o valor do PCN da pista, tendo-se obtido os valores apresentados na Figura 4.12, na Figura 4.13 e na Figura 4.14.

Na Figura 4.11 apresenta-se o novo padrão de tráfego que permite considerar a aeronave A380-800 como aeronave crítica, com um número de movimentos equivalente no valor de 18.126.

Vehicles **Show Mixed Traffic / ACN/PCN**

PAV_BA11 ☒ Auto Detect Controlling

Pavement Type: **Flexible** Subgrade Category: **Cat A** Traffic Area: **Area A**

Vehicle	Weight (lb)		Passes		Equivalent Passes
	Areas A, B	Areas C, D	Areas A, B, C	Area D	
AIRBUS A319-100	166800	125100	580	6	1
AIRBUS A320-200	149911	112433	5358669	53589	1
AIRBUS A330-200	509039	381779	16963	170	8884
AIRBUS A380-800 DISS	1272067	954050	9000	90	9000
AN-124 RUSSIAN	864210	648158	40	1	1
BOEING 737-100	82500	61875	9821	98	1
AIRBUS A380-800 DISS	1272067	954050			18126

Subgrade Category	Flexible (CBR,%)	Rigid (k,pci)	Traffic	Description
A	CBR >= 13	K >= 442	A	Taxiways & Runway Ends
B	8 < CBR < 13	221 < K < 442	B	Aprons
C	4 < CBR <= 8	92 < K <= 221	C	Runway Interiors
D	CBR <= 4	K <= 92	D	Runway Edges

Figura 4.11 - Padrão de tráfego dimensionado

Na Figura 4.12 apresenta-se o PCN redimensionado para o reforço em TMN 12,5 mm (II) e (III) para o tráfego considerado na Figura 4.11, tendo-se obtido o valor de 99/R/D/W/T.

Current Section: 01 1 19/04/2003

Run Properties **Layer Manager** **Edit Settings**

Build Structures

Layer Type	Material Type	Frost	Thick (in)	K (pci)	Flex Str (psi)
AC Overlay			15,10		
PCC Base Slab			8,66		653
Stab Base	PCC Stab-GW,GP,		6,69		
Natural Subgrad	Cohesive Cut	F0		221	

Layer Set Controls - 2 of 2

Pavement Type: Rigid PCC Crit: Stress

Eff K: Rigid Criteria: Shattered Slab

Commands

Current Vehicle: AIRBUS A380-800 DISS ACN/PCN: 0,9

Results

Time	Passes	ACN	PCN	Allowable(Kips)	Load	Passes
Jan-Dec	18126	93	99/R/D/W/T	1322,4		24731

Welcome to APE/CBR Analysis.

< --- Step 1: Click the button on this row called "Edit" and build your layers.

< --- Step 2: Click the button on this row called "Run Analysis". View your results below.

Figura 4.12 - PCN recalculado para reforço em SMA com TMN 12,5 mm (II) e 12,5 mm (III)

Na Figura 4.13 apresenta-se o PCN determinado para o reforço em TMN 12,5 mm (I) para o tráfego considerado na Figura 4.11, tendo-se obtido o valor de 94/R/D/W/T.

Current Section: 01 1 19/04/2003

Layer Manager

Layer Type	Material Type	Frost	Thick (in)	K (pci)	Flex Str (psi)
AC Overlay			14,37		
PCC Base Slab			8,66		653
Stab Base	PCC Stab-GW/GP.		6,69		
Natural Subgrad	Cohesive Cut	F0		221	

Layer Set Controls - 2 of 2

Eff K: ? Rigid Criteria: Shattered Slab

Commands: Run Analysis

Current Vehicle: AIRBUS A380-800 DISS ACN/PCN 1,0

Results

Time	Design Passes	ACN	PCN	Allowable (Kips) Load	Passes
Jan-Dec	18126	93	94/R/D/W/T	1277,5	18808

Figura 4.13 - PCN recalculado para reforço em SMA com TMN 12,5 mm (I)

Na Figura 4.14 apresenta-se o PCN associado ao reforço em TMN 16 mm, para o tráfego considerado na Figura 4.11, tendo-se obtido o valor de 87/R/DW/T.

Current Section: 1 A0103 19/04/2003

Layer Manager

Layer Type	Material Type	Frost	Thick (in)	K (pci)	Flex Str (psi)
AC Overlay			13,39		
PCC Base Slab			8,66		653
Stab Base	PCC Stab-GW/GP.		6,69		
Natural Subgrad	Cohesive Cut	F0		221	

Layer Set Controls - 1 of 1

Eff K: ? Rigid Criteria: Shattered Slab

Commands: Run Analysis

Current Vehicle: AIRBUS A380-800 DISS ACN/PCN 1,1

Results

Time	Design Passes	ACN	PCN	Allowable (Kips) Load	Passes
Jan-Dec	18126	93	87/R/DW/T	1219,5	13119

Figura 4.14 - PCN recalculado para reforço em SMA com TMN 16 mm

Para esta nova situação, em que se passou a considerar a operação da aeronave A380-800, verificou-se que, mesmo com um aumento no tráfego de 8.206 novas movimentações desta aeronave, o reforço do pavimento em SMA continua viável estruturalmente pois, para as três diferentes espessuras, o PCN obtido, multiplicado por 1,1, é sempre superior ao ACN de 93 (Quadro 4.9).

Quadro 4.9 - PCN calculado para as diferentes misturas e espessuras

Misturas de SMA	PCN calculado
TMN 12,5 mm (II) e 12,5 mm (III) (384 mm)	99/R/D/W/T
TMN 12,5 mm (I) (365 mm)	94/R/D/W/T
TMN 16 mm (I) (340 mm)	87/R/D/W/T

Tendo em consideração o dimensionamento obtido para cada um dos SMA, e valores ACN/PCN respectivos, em que os valores dos módulos de rigidez reais não são contemplados, pode-se admitir que estes são superiores aos apresentados, numa variação linear aos respectivos módulos de rigidez. Assim, pode-se admitir que o valor de PCN para o SMA com TMN de 16mm de 99/R/D/W/T.

Não obstante a camada de reforço preferencial para a pista da BA11 ser constituída pelo SMA 16 mm, propõe-se a aplicação da camada de pavimento da seguinte forma: duas aplicações de SMA 16 mm de 120 mm de espessura, seguida de duas camadas em SMA 12,5 mm (I) de 60 mm, obtendo-se uma espessura total de 360mm (120 + 120 + 60 + 60) (Figura 4.15). Esta distribuição visa garantir a boa aplicação e regularização das camadas, a nível construtivo, assim como garantir os valores de PCN obtidos no dimensionamento.

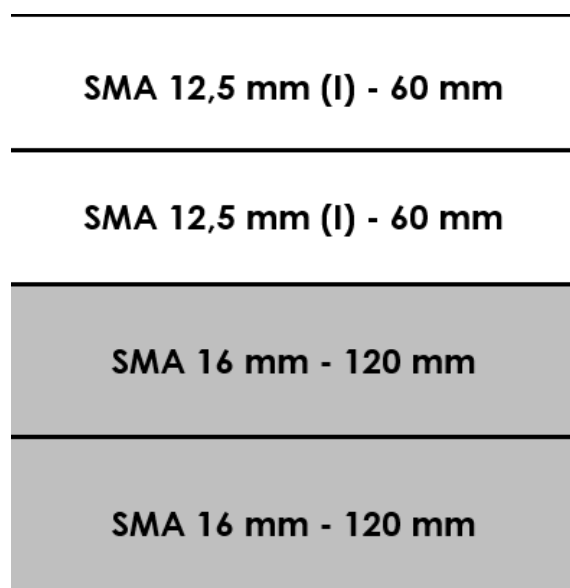


Figura 4.15 - Proposta de reforço

O PCN obtido apresenta o valor de 92/R/D/W/T (Figura 4.16), devendo ter-se em conta o facto de que se encontram aplicados dois tipos de SMA distintos que não são contabilizados pelo software; apenas se tem em conta a espessura da camada de reforço. Assim, é passível de se concluir, tendo em conta as características dos SMA aplicados, que o PCN real será superior ao determinado pelo *software*.

The screenshot shows the 'Layer Manager' window of the 'APE/CBR Analysis' software. The 'Build Structures' table lists the following layers:

Layer Type	Material Type	Frost	Thick (in)	K (pci)	Flex Str (psi)
AC Overlay			14,17		
PCC Base Slab			8,66		653
Stab Base	PCC Stab-GW,GP,		6,69		
Natural Subgrad	Cohesive Cut	F0		221	

Below the table, the 'Layer Set Controls' section shows 'Pavement Type: Rigid' and 'PCC Crit: Stress'. The 'Eff K' is set to '?', and 'Rigid Criteria' is 'Shattered Slab'. The 'Commands' section has a 'Run Analysis' button. The 'Current Vehicle' is 'AIRBUS A380-800 DISS'. The 'Results' section shows the following data:

Time	Design	ACN	PCN	Allowable (Kips)
Jan-Dec	18126	93	92/R/D/W/T	1265,8

On the right side of the window, there is a 'Welcome to APE/CBR Analysis.' message and two steps: 'Step 1: Click the button on this row called "Edit" and build your layers.' and 'Step 2: Click the button on this row called "Run Analysis". View your results below.'

Figura 4.16 - PCN para reforço em SMA proposto

4.3 Conclusões

Neste capítulo estudou-se o reforço estrutural em SMA do pavimento da pista partilhada pelo aeroporto de Beja e pela BA11. O SMA é um tipo de mistura que se encontra associado a pavimentos flexíveis, mas que, devido à sua estrutura granulométrica, contribui, também, com alguma resistência à flexão, o que melhora a sua capacidade resistente de pavimentos rígidos. De forma a determinar o contributo deste tipo de reforço ao pavimento já existente, foi realizado um estudo a cinco tipos de constituições de SMA.

Foi possível compreender que o módulo de rigidez do SMA varia de forma direta com a constituição granulométrica utilizada e com a percentagem de betume e a presença de fibras na sua constituição. Para as constituições com TMN de granulometria de 16 mm o módulo de deformabilidade é superior ao da mistura com TMN de 12,5 mm, o mesmo se verificando quando esta é comparada com a de TMN de 9,5 mm. Inversamente proporcional, encontra-se a resistência à tração, que aumenta com a redução do valor do TMN.

Para o dimensionamento do reforço estrutural a aplicar ao pavimento da pista da BA11 foi necessário elaborar um estudo relativo às movimentações aeronáuticas em Portugal continental, de

forma a ser possível dimensionar um reforço com capacidade de responder às novas solicitações, devido ao tráfego aéreo admitido, ao longo dos 20 anos de vida útil do pavimento.

Foi realizada uma análise às principais companhias aéreas a operar em Lisboa e Faro, com o objetivo de definir o número de voos de cada companhia aérea, assim como a aeronave mais limitante de cada companhia para o pavimento.

Recorrendo ao software de dimensionamento FAARFIELD foram determinadas as espessuras de reforço a aplicar para cada tipo de SMA previamente estudado, de modo a responder às solicitações consideradas. Assim, obteve-se quatro espessuras distintas: 395mm para o SMA 9,5 mm, 365 mm para o SMA 12,5 mm (I); 385mm para o SMA 12,5 mm (II) e (III); e 340 mm para o SMA 16 mm. Contudo, este dimensionamento apresenta uma limitação, pelo facto de o software não incluir a resistência à flexão deste tipo de material, o que é relevante na medida em que esta característica o torna diferente de um betuminoso convencional.

Para calcular o PCN do pavimento para os vários reforços obtidos, recorreu-se ao software PCASE que, a partir do tráfego aéreo a que o pavimento se encontra sujeito ao longo dos 20 anos, determina a aeronave condicionante para o pavimento previamente dimensionado.

Contudo, a definição da estrutura do pavimento do software apresenta limitações a nível da definição do pavimento. Visto que a pista da BA11 é constituída por um pavimento rígido, e o reforço a aplicar ser flexível, não foi possível definir a estrutura com as características determinadas, pelo facto de o software limitar a configuração do pavimento, ao inserir camada de betão de cimento - definindo automaticamente que se trata de um pavimento rígido. Nesta situação, apenas é permitido a integração de uma camada de reforço flexível com características já pré-definidas, impossibilitando a manipulação das características mecânicas de acordo o material a adotar. Assim, o estudo do PCN do pavimento considerou, apenas, a espessura do reforço e não as características da mistura de SMA aplicada, justificando assim a razão do PCN aumentar sempre com a espessura, mesmo quando aplicadas as misturas de SMA com menor módulo de rigidez.

Tendo em consideração todas as conclusões acima expostas optou-se então pela aplicação de uma estrutura de reforço a quatro camadas. Duas camadas inferiores com 120 mm de espessura cada de SMA 16, seguido de duas camadas com 60 mm de espessura cada de SMA 12,5 mm. Esta proposta de reforço visa garantir a boa aplicação e regularização das camadas a nível construtivo, assim como assegurar a viabilidade estrutural para o tráfego dimensionado.

A preços atuais de mercado, avalizados através de contato com operador ativo, o dimensionamento efetuado daria um custo por m² na ordem dos 50 euros (1,2 €/10mm de espessura/m² adicionado do custo de preparação da superfície e regas de colagem).

Tendo em consideração o elevado valor de custo para execução do reforço do pavimento, seria necessário considerar outras alternativas de materiais e, também, analisar uma abordagem estrutural mais adaptada às características dos materiais a usar, que ultrapasse as limitações

referidas. Desse modo, poder-se-à, eventualmente, obter uma melhor relação custo/benefício para a solução de reabilitação estrutural.

5. Conclusões

5.1 Considerações finais

Com o aumento das necessidades aeroportuárias que se vêm verificando nos últimos anos, surge a necessidade de criar aeroportos com maiores capacidades, quer para aeronaves, quer para passageiros, assim como conceber aeronaves de maior capacidade, quer para voos de maiores distâncias, quer para o transporte de um maior número de passageiros por voo.

Por sugestão da FA, surge o âmbito desta dissertação, como forma de responder a necessidades civis e militares, tendo-se realizado um estudo com o objetivo de analisar uma proposta de reforço para a pista partilhada pelo aeroporto de Beja e pela BA11, que permita acomodar as operações da aeronave Airbus A380-800.

Neste estudo, foi necessário dimensionar um reforço estrutural que, adicionalmente às movimentações da aeronave A380, permita ao pavimento suportar uma alteração de tráfego aéreo existente nos aeroportos de Lisboa e de Faro, considerada pelo autor. Com este objetivo, escolheu-se o material SMA como material a estudar, de forma a se aplicar na camada de reforço, visto tratar-se dum material recente, com potencial para suportar cargas elevadas e ainda pouco utilizado nas infraestruturas nacionais.

5.2 Conclusões gerais

Ao longo desta dissertação foi possível compreender que os pavimentos podem ser de três tipos diferentes, rígidos, flexíveis e semirrígidos, que influenciam o tipo de resposta dos mesmos às ações a que estão sujeitos. O pavimento rígido apresenta uma capacidade resistente elevada às ações aplicadas, compatível com esforços elevados, enquanto que um pavimento flexível apresenta uma capacidade de deformação superior.

De forma a permitir um melhor dimensionamento de reforço, foi necessário compreender o estado atual do pavimento. Para tal, foi necessário realizar um estudo dos ensaios realizados à pista de Beja. Sendo esta pista constituída por um pavimento rígido, foram analisados os coeficientes de atrito, ensaios de carga realizados pelo defletómetro de impacto e o estado de tensão induzido nas lajes devido ao pré-esforço.

Concluiu-se que os valores de atrito obtidos, próximos da berma da pista, se encontram, em vastas extensões, abaixo dos limites mínimos, necessitando, assim, de recuperações funcionais nestas áreas.

Os ensaios de carga permitiram analisar o estado estrutural do pavimento rígido, e relacionar a capacidade de carga, aquando da construção do pavimento com a capacidade atual, contribuindo para um melhor dimensionamento do reforço necessário. À data do término da construção da

pista, a laje equivalente à laje pré-esforçada de 16 cm de espessura teria dimensões próximas dos 40 cm, muito superiores aos atuais 22 cm determinados através do BISAR.

Relativamente aos cabos de pré-esforço, conclui-se que se encontram em boas condições de conservação, sem evidências de corrosão ou de perda acentuada dos valores de tensão inicialmente induzidos.

Para proceder ao dimensionamento do reforço, recorreu-se aos softwares PCASE e FAARFIELD. Esta escolha deveu-se ao facto de serem os utilizados pela FA. Contudo, apresentaram algumas limitações devido à constituição do pavimento existente e à natureza do reforço. O FAARFIELD não permitiu a inclusão da resistência à flexão aliada ao módulo de rigidez, uma das características que levou a escolha da utilização do SMA como material de reforço. O software PCASE não compatibiliza a aplicação de uma camada flexível num pavimento pré-esforçado, o que levou a um cálculo do PCN menos realista, sendo influenciado apenas pelas variações de espessura.

As espessuras de reforço dimensionadas, recorrendo ao FAARFIELD, para cada tipo de SMA previamente estudado, não apresentam diferenças suficientemente significativas: uma espessura de 340 mm para o SMA 16 mm, 365 mm para o SMA 12,5 mm (I), 385 mm para o SMA 12,5 mm (II) e (III) e 395 mm para o SMA 9,5 mm.

O PCN correspondente às espessuras calculadas foram os representados no Quadro 5.1. Não obstante as limitações anteriormente referidas, estes valores são influenciados pelo tráfego aéreo para o qual foram calculados.

Quadro 5.1 - PCN calculado para as diferentes misturas e espessuras

Misturas de SMA	PCN calculado
TMN 12,5 mm (II) e 12,5 mm (III) (384 mm)	73/R/D/W/T
TMN 12,5 mm (I) (365 mm)	70/R/D/W/T
TMN 16 mm (I) (340 mm)	66/R/D/W/T

Para determinação do tráfego aéreo, utilizou-se os dados estatísticos relativos às movimentações aeronáuticas dos aeroportos de Lisboa, de Faro e de Beja. Considerou-se que, para este dimensionamento, parte do tráfego aéreo seria movimentado para o aeroporto de Beja. Assim, 5% do tráfego relativo ao aeroporto de Faro e de Lisboa passaria a utilizar o aeroporto de Beja, estimando-se o número de movimentações da aeronave A380-800, em 24 por ano. Estas movimentações estariam sujeitas a uma taxa de crescimento anual de 5%, uma taxa inferior à tendência observada nos últimos anos, de 10%, mas que permitiria continuar a considerar o crescimento de tráfego para o dimensionamento, ao longo dos 20 anos de vida útil.

5.3 Desenvolvimentos futuros

Ao longo da elaboração desta dissertação notaram-se algumas dificuldades a nível da informação necessária para uma melhor determinação de soluções. De forma a mitigar estas dificuldades, em estudos futuros, sugere-se os seguintes passos:

- a realização de inspeções visuais, avaliações funcionais e estruturais ao pavimento com intervalos de tempo mais reduzidos, permitindo a utilização de dados mais atualizados para a gestão dos tempos de reabilitação;
- elaboração de dados mais específicos, referentes ao tráfego aéreo nos aeroportos civis e militares, assim como uma melhor definição das aeronaves críticas, permitindo melhores previsões da evolução do tráfego aéreo;
- cálculo do PCN da pista associado a um levantamento periódico da condição do pavimento e acompanhamento da sua evolução; em particular, com a possibilidade de indicar quando novas aeronaves poderão utilizar o aeroporto, ou quando se verifique a necessidade de alterar a aeronave crítica;

Foram detetadas várias limitações a nível de software de cálculo de dimensionamento, o que pode ter consequências na validade das soluções a que se chegou, podendo resultar em custos acrescidos que seriam evitáveis. Assim, propõe-se o desenvolvimento de novos programas de dimensionamento, ou atualização dos atuais, por forma a colmatar as limitações encontradas a nível da aplicação de materiais que beneficiem do módulo de rigidez e resistência à flexão em simultâneo, assim como, para situações em que se aplique reforços de materiais flexíveis em pavimentos rígidos.

Propõe-se um estudo à situação analisada utilizando o método dos elementos finitos, que proporcionaria outro tipo de resultados que poderiam colmatar as lacunas detetadas nos valores apresentados nesta dissertação, assim como proceder a uma comparação de soluções, com o objetivo de atingir uma melhor opção de reforço estrutural.

Referências bibliográficas

- [1] ANAC, Autoridade Nacional da Aviação Cível, "Relatório Relativo ao tráfego das principais companhias aéreas nacionais nº 1", 2016;
- [2] GIOVINI, Moshe, RIETVELD, Piet, "Choice of Aircraft Size - Explanations and Implications", 2006.;
- [3] SILVA, António Oliveira e, (2018, 17 de Julho), "Lisboa, o turismo e um aeroporto saturado", Euronews.;
- [4] ARNALDO, Rodolfo Guilherme Nunes e Silva "Reabilitação Estrutural de Pavimentos Aeronáuticos em Betão Pré-esforçado", 2011, Dissertação de Mestrado em Engenharia de Aeródromos, Academia da Força Aérea;
- [5] MELLO, António Cabral "Construção dos pavimentos Rígidos em Betão Pré-Esforçado nas Pistas da Base Aérea N.º11 em Beja", 1962, Relatório de Estágio, Instituto Superior Técnico;
- [6] VELOSO, Joaquim José Carvalheira Baptista - "Memorando do Dimensionamento e Avaliação dos Pavimentos Pré-Esforçados das Pistas da BA11-Beja," 2002;
- [7] ANA, Aeroportos de Portugal - "Coeficiente de Atrito da Pista 01L-19R, Base Aérea N.º11- Beja," 2010.
- [8] BRANCO, Fernando, PEREIRA, Paulo, SANTOS, Luís Picado - "Pavimentos Rodoviários", 2ª Reimpressão, Edições Almedina, SA, Coimbra,2006;
- [9] WITCZAK, M. W., YODER, E. J., "Principles of Pavement Design", 2ª Edição, John Wiley & Sons, 1975;
- [10] KELLY, Joe W., "Cracks in concrete the causes and cures", 1963;
- [11] RAMALHO, Rute Castro Lopo, 'Diretrizes para avaliação funcional de pavimentos aeronáuticos', 2012, Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto;
- [12] MONTEIRO, Mariana Prazeres Campinho, "Perspectivas de Interpretação dos Ensaios de Avaliação do Coeficiente de Atrito em Pavimentos Aeronáuticos", 2009
- [13] NEGA, Ainalem, NIKRAZ, Hamid, AL-QADI, Imad L., "ScienceDirect Dynamic analysis of falling weight deflectometer", Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2016;
- [14] RICHTER, C. A., "Enhanced Analysis of Falling Weight Deflectometer Data for Use With Mechanistic-Empirical Flexible Pavement Design and Analysis and Recommendations for Improvements to Falling Weight Deflectometers", 2017;
- [15] USACE - "Rigid Airfield Pavements," Corps of Engineers, U.S. Army Manual, EM 1110-45- 303, 1958;
- [16] ANTUNES, M. L. - "Classificação ACN/PCN das Pistas da Base Aérea de Beja," 2003;
- [17] SILVA, Maurício Batista da, "Caracterização de mistura de alto desempenho tipo SMA e avaliação do processo executivo em pista experimental no Estado do Rio Grande do Sul", 2012, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul;
- [18] FILHO, Clonilo Moreira Sendeaux de Oliveira - "Estudo do efeito de diferentes granulometrias no comportamento mecânico de misturas asfálticas densas descontínuas tipo stone matrix asphalt (SMA)", 2007 ,

Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará;

[19] ANAC, Autoridade Nacional da Aviação Civil, "Boletim Estatístico Trimestral nº33 1º Trimestre de 2017", 2017;

[20] ANAC, Autoridade Nacional da Aviação Civil, "Boletim Estatístico Trimestral nº34 2º Trimestre de 2017", 2017;

[21] ANAC, Autoridade Nacional da Aviação Civil, "Boletim Estatístico Trimestral nº35 3º Trimestre de 2017", 2017;

[22] ANAC, Autoridade Nacional da Aviação Civil, "Boletim Estatístico Trimestral nº36 4º Trimestre de 2017", 2017;

[23] "BA enters SuperJumbo age with... with a 90-minute flight to Frankfurt". The Independent, 2 de agosto de 2013;

[24] «Air France gets Europe's first A380 superjumbo». Agence France-Presse. 30 de outubro de 2009. Cópia arquivada em 27 de fevereiro de 2014;

[25] «Lufthansa flies German team to Johannesburg with A380». Lufthansa. 7 de abril de 2010;

[26] <http://www.hifly.aero/pt/hi-fly-a380-faz-historia-aviacao-portuguesa.html>;

Anexo A - Movimentações nos aeroportos de Lisboa e Faro por companhia aérea

Quadro A.1 - Movimentos no aeroporto de Lisboa por companhia aérea (1º Trimestre) [19]

10 Maiores companhias Aéreas	Quota de Mercado	Nº de Movimentos
	Jan - Mar 2017	
TAP - Portugal	56%	23.665
Ryanair, Ltd.	9%	3.803
Easyjet Airline Company Limited	7%	2.958
IBERIA L.A.E. S.A. OPERADORA	2%	845
Vueling Airlines, S.A.	2%	845
Deutsche Lufthansa Ag.	2%	845
Air France	2%	845
Air Europa Líneas Aéreas, S.A.U.	2%	845
Transavia France	1%	423
British Airways, Plc.	1%	423
		42.259

Quadro A.2 - Movimentos no aeroporto de Lisboa por companhia aérea (2º Trimestre) [20]

10 Maiores companhias Aéreas	Quota de Mercado	Nº de Movimentos
	Abr - Jun 2017	
TAP - Portugal	54%	27.707
Ryanair, Ltd.	9%	4.618
Easyjet Airline Company Limited	8%	4.105
SATA Internacional, S.A.	2%	1.026
Vueling Airlines, S.A.	2%	1.026
Deutsche Lufthansa Ag.	2%	1.026
IBERIA L.A.E. S.A. OPERADORA	2%	1.026
Transavia France	2%	1.026
Air France	1%	513
Air Europa Líneas Aéreas, S.A.U.	1%	513
		51.309

Quadro A.3 - Movimentos no aeroporto de Lisboa por companhia aérea (3º Trimestre) [21]

10 Maiores companhias Aéreas	Quota de Mercado	Nº de Movimentos
	Jul - Set 2017	
TAP - Portugal	55%	31.821
Ryanair, Ltd.	8%	4.628
Easyjet Airline Company Limited	7%	4.049
SATA Internacional, S.A.	2%	1.157
Vueling Airlines, S.A.	2%	1.157

10 Maiores companhias Aéreas	Quota de Mercado	Nº de Movimentos
	Jul - Set 2017	
Deutsche Lufthansa Ag.	2%	1.157
Air France	1,5%	868
Transavia France	1,4%	810
IBERIA L.A.E. S.A. OPERADORA	1,4%	810
Air Europa Líneas Aéreas, S.A.U.	1,1%	636
		57.856

Quadro A.4 - Movimentos no aeroporto de Lisboa por companhia aérea (4º Trimestre) [22]

10 Maiores companhias Aéreas	Quota de Mercado	Nº de Movimentos
	Out - Dez 2017	
TAP - Portugal	58	29.229
Ryanair, Ltd.	9	4.535
Easyjet Airline Company Limited	7	3.528
SATA Internacional, S.A.	2	1.008
Vueling Airlines, S.A.	2	1.008
IBERIA L.A.E. S.A. OPERADORA	2	1.008
Deutsche Lufthansa Ag.	2	1.008
Air France	1	504
Air Europa Líneas Aéreas, S.A.U	1	504
Transavia France	1	504
		50.394

Quadro A.5 - Movimentos no aeroporto de Faro por companhia aérea (1º Trimestre) [19]

10 Maiores companhias Aéreas	Quota de Mercado	Nº de Movimentos
	Jan - Mar 2017	
Ryanair, Ltd.	25%	1.683
Easyjet Airline Company Limited	20%	1.346
Transavia Airlines, Cv.	8%	538
Monarch Airlines Ltd	8%	538
TAP - Portugal	4%	269
Jet2.com (Channel Express)	4%	269
Air Berlin PLC & Co. Luftverkehrs KG	3%	202
British Airways, Plc.	3%	202
TUIfly GmbH	2%	135
Flybe Limited	2%	135
		6.731

Quadro A.6 - Movimentos no aeroporto de Faro por companhia aérea (2º Trimestre) [20]

10 Maiores companhias Aéreas	Quota de Mercado	Nº de Movimentos
	Abr - Jun 2017	
Ryanair, Ltd.	26%	4.850

10 Maiores companhias Aéreas	Quota de Mercado	Nº de Movimentos
	Abr - Jun 2017	
Easyjet Airline Company Limited	16%	2.984
Jet2.com (Channel Express)	7%	1.306
Monarch Airlines Ltd	6%	1.119
Transavia Airlines, Cv.	5%	933
Aer Lingus, Plc.	5%	933
TAP - Portugal	3%	560
British Airways, Plc.	2%	373
Transavia Airlines, Cv.	2%	373
Niki Luftfahrt, Gmbh	2%	373
		18.652

Quadro A.7 - Movimentos no aeroporto de Faro por companhia aérea (3º Trimestre) [21]

10 Maiores companhias Aéreas	Quota de Mercado	Nº de Movimentos
	Jul - Set 2017	
Ryanair, Ltd.	24%	5.360
Easyjet Airline Company Limited	16%	3.573
Jet2.com (Channel Express)	9%	2.010
Monarch Airlines Ltd	6%	1.340
Transavia Airlines, Cv.	5%	1.117
Aer Lingus, Plc.	5%	1.117
TAP - Portugal	3%	670
British Airways, Plc.	2,5%	558
Thomsonfly	2,5%	558
Transavia France	1,9%	424
		22.332

Quadro A.8 - Movimentos no aeroporto de Faro por companhia aérea (4º Trimestre) [22]

10 Maiores companhias Aéreas	Quota de Mercado	Nº de Movimentos
	Out - Dez 2017	
Ryanair, Ltd.	26%	2.577
Easyjet Airline Company Limited	19%	1.883
TAP - Portugal	6%	595
Jet2.com (Channel Express)	6%	595
Transavia Airlines, Cv.	6%	595
British Airways, Plc.	3%	297
Aer Lingus, Plc.	3%	297
Eurowings GmbH	3%	297
Niki Luftfahrt, Gmbh	2%	198
Transavia France	2%	198
		9.991