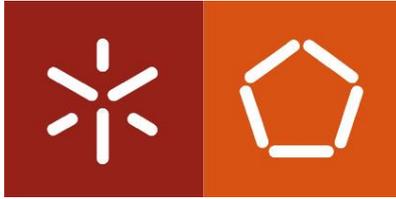


**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

Maria Inês de Castro Lima

**Avaliação do PCN em pavimentos  
aeroportuários**





**Universidade do Minho**

Escola de Engenharia

Maria Inês de Castro Lima

**Avaliação do PCN em pavimentos  
aeroportuários**

Dissertação de Mestrado  
Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do  
Professor Doutor Jorge Carvalho Pais  
e da Professora Doutora Ana Cristina Freire



Dedico este trabalho aos meus pais, João e Elvira, que colocaram os estudos como a principal prioridade na minha vida e acreditam no meu sucesso. E claro, não podia esquecer a pessoa que amo de igual forma, a minha irmã, Sara, que sempre me deu amor, carinho, admiração e respeito.



## Agradecimentos

Este trabalho só foi possível com o apoio e colaboração de diferentes pessoas às quais gostaria de manifestar os meus mais profundos e sinceros agradecimentos e reconhecimento pela ajuda concedida no decurso da sua elaboração, em particular:

Ao Professor Doutor Jorge Carvalho Pais, Professor da Universidade do Minho, orientador científico, pela possibilidade de desenvolver este tema sob sua excelente orientação e interesse demonstrado ao longo da realização desta dissertação, pelas valiosas sugestões, pelo incentivo e alento, pela leitura crítica do original e pela amizade e disponibilidade sempre demonstradas.

Ao Eng.º Rui Ramos, Diretor de Curso de Engenharia Civil da Universidade do Minho, por todos os momentos passados, pela forma como fez com que confiasse nos meus ideais e pelo crescimento pessoal e profissional que me ensinou.

À Eng.ª Ana Cristina Freire, Investigadora do LNEC, pela disponibilidade demonstrada, pelos conhecimentos técnicos e informação que me disponibilizou.

À Eng.ª Vânia Marecos, Bolseira de Doutoramento do LNEC, pela disponibilidade permanente, empenho, preciosa ajuda e disponibilização de elementos essenciais para a elaboração do caso de estudo prático.

À Eng.ª Simone Fontul, Investigadora do LNEC, pela receção calorosa com que me recebeu, pela apresentação das instalações e de todos os funcionários do LNEC, assim como toda a sua alegria contagiante e disponibilidade demonstrada.

Ao Eng.º Pedro Domingos, Investigador do LNEC, pela disponibilização da sua dissertação e do programa ELSYPAV, sem si não seria possível terminar o trabalho proposto para as semanas de estágio no LNEC.

Quero agradecer a todos os funcionários em geral do LNEC por toda a boa disposição, alegria e empenho para a boa integração no estágio lá realizado.

Ao Professor Doutor Manuel Minhoto, Professor do Instituto Politécnico de Bragança, pela disponibilidade, informações transmitidas acerca das características do Aeródromo de

Bragança e simpatia em me receber no Instituto Politécnico de Bragança, na apresentação de todas as instalações deste e no Aeroporto de Bragança para a realização do trabalho de campo.

Ao Eng.º Carlos Fernandes Palha do Laboratório de Pavimentos Rodoviários da Universidade do Minho, pela colaboração na disponibilização do equipamento e material necessário para o ensaio com o defletómetro de impacto, sem ele uma componente da dissertação não poderia ter sido aplicada.

Ao Eng.º Mike Roginski, Engenheiro Aeronáutico, autor de várias publicações acerca do programa COMFAA, pela colaboração na disponibilização de documentos que dispunha acerca do programa COMFAA.

E finalmente à minha família: aos meus pais, pelo seu amor, apoio emocional e económico, motivação e paciência durante estes seis longos anos, nos quais sempre confiaram em mim. Há minha irmã e ao seu namorado Luís, que além de amigos, são as pessoas que melhor me conhecem, muito obrigado pelo incentivo, apoio, paciência, compreensão e amor demonstrados em todos os momentos.

*“Nenhuma descoberta foi feita jamais sem um palpite ousado.”*

*Isaac Newton*



## Resumo

A crescente utilização de aeródromos e aeroportos por aviões com maiores dimensões e pesos obriga a que os sistemas de classificação das pistas, caminhos de circulação e plataformas de estacionamento tenham a sua capacidade de carga bem definida de modo a conhecer os aviões que aí podem circular e estacionar. Esta capacidade de carga tem sido referida através de um parâmetro denominado de PCN, resultado da terminologia inglesa Pavement Capacity Number, o qual é obtido através de normas ou procedimentos existentes.

Assim, esta dissertação de mestrado tem como objetivo apresentar de forma resumida as normas e procedimentos existentes para a avaliação do PCN, e através de uma aplicação prática explicar a sua aplicação, tendo-se estudado o método proposto pela FAA (Federal Aviation Administration), o qual recorre ao programa de cálculo COMFAA e ao método derivado da metodologia empírico-mecanicista de dimensionamento de pavimentos.

Quanto à utilização do programa COMFAA, método que tem por base o procedimento de dimensionamento de pavimentos baseado no CBR, são referidos os passos para a determinação do PCN e do ACN (Aircraft Classification Number) enquanto no método empírico-mecanicista são apresentados os modelos de comportamento considerados e o procedimento de cálculo do PCN.

A aplicação prática destes métodos é realizada para o caso do Aeródromo de Bragança, onde se realizaram ensaios de capacidade de carga, os quais permitiram a obtenção de dados tanto para o programa COMFAA como para o método empírico-mecanicista.

Os resultados de PCN obtidos pelos dois métodos são comparados de modo a avaliar o efeito que os vários critérios de dimensionamento têm na quantificação deste parâmetro.

### PALAVRAS-CHAVE:

- Pavimentos aeroportuários;
- Avaliação estrutural;
- Programa de cálculo COMFAA;
- Classificação PCN.



**Abstract**

Due to the increasing use of aerodromes and airports by airplanes with dimensions and weights also growing, the classification systems of runway, taxiways and aprons must have a load capacity well defined so airplanes are allowed to use it. This load capacity has been defined by PCN parameter (Pavement Capacity Number) conceded by standards or procedures, already existent.

Hence, the primordial objective of the present dissertation is to resume the standards and procedures used for PCN evaluation by a practical use, studying FAA (Federal Aviation Administration) method, which uses the COMFAA software and empirical-mechanistic method utilized in pavement design.

About the COMFAA software, it is important to mention that the procedure uses the CBR method for the calculation for PCN and ACN (Aircraft Classification Number) while for the empirical-mechanistic method the behaviour models and the PCN calculation procedures are presented.

Load capacity testing was realized in Bragança Airport, allowing the achievement of data for COMFAA and empirical-mechanistic.

Finally, the results of PCN obtained with the two methods are compared so that the effect of the various design criteria on the quantification of PCN, are possible to evaluate.

**KEYWORDS**

- Airport Pavements;
- Evaluation structural;
- COMFAA computer program;
- PCN classification.



**Capítulo 1**

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento .....	1
1.2. Objetivo .....	2
1.3. Estrutura da dissertação .....	3

**Capítulo 2**

2. PROCEDIMENTOS DE AVALIAÇÃO DO PCN.....	5
2.1. Método ACN-PCN .....	5
2.2. Determinação do ACN.....	6
2.2.1. Introdução.....	6
2.2.2. Aplicação .....	7
2.3. Determinação do PCN .....	7
2.3.1. Introdução.....	7
2.3.2. Procedimentos para notificação do PCN.....	8
2.4. Método da FAA utilizando o programa de cálculo COMFAA .....	11
2.4.1. Tráfego anual e propriedades do pavimento.....	11
2.4.2. Cálculo do PCN.....	14
2.5. Método empírico-mecanicista .....	17
2.5.1. Módulos de deformabilidade .....	17
2.5.2. Valor do PCN .....	22
2.5.3. Exemplo de aplicação do método empírico-mecanicista .....	23
2.6. Conclusão .....	50

**Capítulo 3**

3. APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE CÁLCULO DO PCN.....	51
3.1. Aeródromo de Bragança.....	51
3.2. Método empírico-mecanicista .....	54
3.2.1. Ensaio de carga com defletómetro de impacto.....	55

---

3.2.2. Zonamento do pavimento.....	56
3.2.3. Caracterização estrutural do pavimento.....	58
3.2.4. Classificação PCN.....	63
3.3. Cálculo do PCN utilizando o programa COMFAA.....	67
3.3.1. Avaliação da espessura.....	72
3.3.2. Cálculo do PCN.....	75
<b>Capítulo 4</b>	
4. CONCLUSÃO.....	87
<b>Capítulo 5</b>	
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89
<b>Capítulo 6</b>	
6. ANEXO.....	91
Tabelas do ACN.....	91

**Capítulo 2**

FIGURA 2.1 - FATORES DE EQUIVALÊNCIA DOS PAVIMENTOS (DEBORD, 2012).....	13
FIGURA 2.2 - FOLHA DE CÁLCULO EXCEL PARA CÁLCULO DA ESPESSURA DO PAVIMENTO (DEBORD, 2012) .....	14
FIGURA 2.3 - INTRODUÇÃO DO MÓDULO DE REAÇÃO E DA ESPESSURA EM AVALIAÇÃO (DEBORD, 2012) .....	15
FIGURA 2.4 - SAÍDA DE RESULTADOS DO PROGRAMA COMFAA .....	15
FIGURA 2.5 - DADOS DO TRÁFEGO .....	16
FIGURA 2.6 - RESULTADOS DO PROGRAMA COMFAA.....	17
FIGURA 2.8 - ASPETO DAS ANTENAS DO RADAR DE PROSPEÇÃO DO LNEC EM POSIÇÃO DE ENSAIO.....	19
FIGURA 2.9 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO RADAR DE PROSPEÇÃO NUM ENSAIO EM PAVIMENTO FLEXÍVEL [ADAPTADO DE (FONTUL, 2004)].....	20
FIGURA 2.10 - ALINHAMENTOS DE ENSAIO COM O DEFLETÓMETRO DE IMPACTO .....	24
FIGURA 2.11 - DEFLEXÕES NORMALIZADAS NA PISTA NO ALINHAMENTO 20W SENTIDO S-N ...	25
FIGURA 2.12 - DEFLEXÕES NORMALIZADAS NA PISTA NO ALINHAMENTO 10W SENTIDO S-N ...	26
FIGURA 2.13 - DEFLEXÕES NORMALIZADAS NA PISTA NO ALINHAMENTO 4W SENTIDO S-N .....	26
FIGURA 2.14 - DEFLEXÕES NORMALIZADAS NA PISTA NO ALINHAMENTO 0W SENTIDO S-N .....	27
FIGURA 2.15 - DEFLEXÕES NORMALIZADAS NA PISTA NO ALINHAMENTO 4E SENTIDO S-N.....	27
FIGURA 2.16 - DEFLEXÕES NORMALIZADAS NA PISTA NO ALINHAMENTO 10E SENTIDO S-N.....	28
FIGURA 2.17 - DEFLEXÕES NORMALIZADAS NA PISTA NO ALINHAMENTO 20E SENTIDO S-N.....	28
FIGURA 2.18 – DIFERENÇAS ACUMULADAS NA PISTA NO ALINHAMENTO 20W SENTIDO S-N.....	29
FIGURA 2.19 - DIFERENÇAS ACUMULADAS NA PISTA NO ALINHAMENTO 10W SENTIDO S-N .....	30
FIGURA 2.20 - DIFERENÇAS ACUMULADAS NA PISTA NO ALINHAMENTO 4W SENTIDO S-N .....	30
FIGURA 2.21 - DIFERENÇAS ACUMULADAS NA PISTA NO ALINHAMENTO 0W SENTIDO S-N .....	31
FIGURA 2.22 - DIFERENÇAS ACUMULADAS NA PISTA NO ALINHAMENTO 4E SENTIDO S-N.....	31
FIGURA 2.23 - DIFERENÇAS ACUMULADAS NA PISTA NO ALINHAMENTO 10E SENTIDO S-N.....	32
FIGURA 2.24 - DIFERENÇAS ACUMULADAS NA PISTA NO ALINHAMENTO 20E SENTIDO S-N.....	32
FIGURA 2.25 - DEFLETOGRAMAS MÉDIOS DA ZONA 1 .....	33
FIGURA 2.26 - DEFLETOGRAMAS MÉDIOS DA ZONA 2 .....	34
FIGURA 2.27 - DEFLETOGRAMAS MÉDIOS DA ZONA 3 .....	34
FIGURA 2.28 - DEFLETOGRAMAS MÉDIOS DA ZONA 4 .....	35
FIGURA 2.29 - DEFLETOGRAMAS MÉDIOS DA ZONA 5 .....	35
FIGURA 2.30 - ZONAS ESTRUTURAIS HOMOGÊNEAS NA PISTA .....	36
FIGURA 2.31 - DADOS DE ENTRADA NO PROGRAMA JPAVBACK .....	41
FIGURA 2.32 - MODELAÇÃO DO ALINHAMENTO CENTRAL 4W RECORRENDO AO PROGRAMA JPAVBACK.....	43

**Capítulo 3**

FIGURA 3.1 - VISTA DO AERÓDROMO DE BRAGANÇA.....	51
FIGURA 3.2 - LOCALIZAÇÃO DO AERÓDROMO DE BRAGANÇA .....	52
FIGURA 3.3 - SEÇÃO DO PAVIMENTO DA PISTA EXISTENTE (LALYRE, 2012).....	54
FIGURA 3.4 - ALINHAMENTO DE ENSAIO COM O DEFLETÓMETRO DE IMPACTO .....	55
FIGURA 3.5 - DEFLEXÕES NORMALIZADAS NO PAVIMENTO NOS ENSAIOS DE CARGA.....	56
FIGURA 3.6 - GRÁFICO DAS DIFERENÇAS ACUMULADAS D (1).....	57
FIGURA 3.7 - ZONAS ESTRUTURAIS HOMOGÊNEAS NA PISTA .....	57
FIGURA 3.8 - MODELAÇÃO DA ZONA HOMOGÊNEA 1 .....	59
FIGURA 3.9 - MODELAÇÃO DA ZONA HOMOGÊNEA 2 .....	60
FIGURA 3.10 - MODELAÇÃO DA ZONA HOMOGÊNEA 3 .....	60
FIGURA 3.11 - MODELAÇÃO DA ZONA HOMOGÊNEA 4 .....	61
FIGURA 3.12 - MODELAÇÃO DA ZONA HOMOGÊNEA 5 .....	61
FIGURA 3.13 - TEMPERATURA MÉDIA ANUAL.....	62
FIGURA 3.14 - PROGRAMA JPAV .....	65
FIGURA 3.15 - DORNIER 228 (ENC24).....	69
FIGURA 3.16 - ATR 42-300 (ENC24) .....	70
FIGURA 3.17 - PIPER SENECA (ENC24) .....	70
FIGURA 3.18 - CESSNA 172 (ENC24) .....	71
FIGURA 3.19 - MORANE SAULNIER 893 (ENC24).....	71
FIGURA 3.20 - FATORES DE EQUIVALÊNCIA DOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS.....	73
FIGURA 3.21 - FOLHA EXCEL PARA CÁLCULO DA CAMADA DO PAVIMENTO EQUIVALENTE.....	75
FIGURA 3.22 - INTRODUÇÃO DO NOME DO AVIÃO .....	77
FIGURA 3.23 - INTRODUÇÃO DO PESO BRUTO .....	78
FIGURA 3.24 - INTRODUÇÃO DA PERCENTAGEM DO PESO BRUTO.....	78
FIGURA 3.25 - INTRODUÇÃO DO NÚMERO DE ENGRENAGENS PRINCIPAIS.....	79
FIGURA 3.26 - INTRODUÇÃO DA PRESSÃO DOS PNEUS .....	79
FIGURA 3.27 - INTRODUÇÃO DO CICLO DE PASSAGEM DO TRÁFEGO.....	80
FIGURA 3.28 - INTRODUÇÃO DAS SAÍDAS ANUAIS.....	80
FIGURA 3.29 - INTRODUÇÃO DO VALOR DO CBR.....	81
FIGURA 3.30 - INTRODUÇÃO DA ESPESSURA EQUIVALENTE .....	82
FIGURA 3.31 - SELEÇÃO DO BOTÃO "BATCH" .....	83
FIGURA 3.32 - SELEÇÃO DO BOTÃO "PCN FLEXIBLE BATCH" .....	83
FIGURA 3.33 - SELEÇÃO DO BOTÃO "DETAILS" .....	84
FIGURA 3.34 - RESULTADOS DE SAÍDA DO PROGRAMA COMFAA.....	85

**Capítulo 4**

FIGURA 4.1 - CARTA DO AERÓDROMO MUNICIPAL DE BRAGANÇA (LALYRE, 2012) .....	88
--	----

**Capítulo 2**

TABELA 2.1 - CONDIÇÕES PARA PAVIMENTOS RÍGIDOS PARA CÁLCULO DO PCN (INAC, 2012)....	8
TABELA 2.2 - CONDIÇÕES PARA PAVIMENTOS FLEXÍVEIS PARA CÁLCULO DO PCN (INAC, 2012)	9
TABELA 2.3 - CÓDIGOS DA PRESSÃO DOS PNEUS PARA O RELATÓRIO DO PCN (AC 150/5335-5A, 2006).....	9
TABELA 2.4 - TIPO DE PAVIMENTO .....	10
TABELA 2.5 - TRÁFEGO ANUAL.....	11
TABELA 2.6 - PROPRIEDADES DO PAVIMENTO DA PISTA (PAVIMENTO RÍGIDO).....	12
TABELA 2.7 - ZONAMENTOS DOS ALINHAMENTOS LATERAIS .....	37
TABELA 2.8 - ZONAMENTOS DOS ALINHAMENTOS CENTRAIS.....	38
TABELA 2.9 - ESPESSURA BETUMINOSA .....	40
TABELA 2.10 - MODELOS ESTRUTURAIS .....	44
TABELA 2.11 - MÓDULOS DE DEFORMABILIDADE DA CAMADA BETUMINOSA PARA A TEMPERATURA DE CÁLCULO .....	45
TABELA 2.12 - VALORES MÁXIMO DAS EXTENSÕES DE TRAÇÃO E DE COMPRESSÃO .....	47
TABELA 2.13 - CLASSES DE RESISTÊNCIA DA FUNDAÇÃO.....	48
TABELA 2.14 - CATEGORIA DA FUNDAÇÃO DE CADA ALINHAMENTO .....	48
TABELA 2.15 - PCN DOS PAVIMENTOS.....	49

**Capítulo 3**

TABELA 3.1 - TRÁFEGO DO AERÓDROMO (ENC24).....	53
TABELA 3.2 - CARACTERIZAÇÃO DAS DEFLEXÕES DAS ZONAS HOMOGÊNEAS .....	58
TABELA 3.3 - MODELOS DE COMPORTAMENTO DO PAVIMENTO .....	62
TABELA 3.4 - MÓDULOS DE DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS BETUMINOSAS PARA A TEMPERATURA DE CÁLCULO .....	63
TABELA 3.5 - VALORES DO RAIOS PARA A DETERMINAÇÃO DAS EXTENSÕES NO JPAV .....	65
TABELA 3.6 - EXTENSÕES PARA O PCN DAS ZONAS HOMOGÊNEAS .....	66
TABELA 3.7 - CLASSE DE RESISTÊNCIA DA FUNDAÇÃO.....	66
TABELA 3.8 - CATEGORIA DA FUNDAÇÃO .....	66
TABELA 3.9 - PCN DO PAVIMENTO .....	67
TABELA 3.10 - ESTIMAÇÃO DO CBR NO MÉTODO EMPÍRICO-MECANICISTA .....	68
TABELA 3.11 - PROPRIEDADES DO PAVIMENTO .....	68
TABELA 3.12 - REFERÊNCIA DA ESPESSURA DO PAVIMENTO FLEXÍVEL PELA FAA (DEBORD, 2012).....	72
TABELA 3.13 - SAÍDAS ANUAIS.....	76
TABELA 3.14 - PRESSÃO DOS PNEUS (AIR31) .....	76
TABELA 3.15 - CARACTERÍSTICAS INTRODUZIDAS NO COMFAA .....	76



## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Enquadramento

Este trabalho intitulado “Avaliação do PCN em pavimentos aeroportuários” refere-se à dissertação de mestrado no âmbito do curso de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, enquadrada no Perfil de Planeamento e Infraestruturas dos Transportes. Este tema surge como consequência do autor pretender desenvolver os seus conhecimentos na área das infraestruturas aeroportuárias, tendo optado pela avaliação do PCN, um parâmetro importante para a classificação dos pavimentos aeroportuários.

Os temas sobre pavimentos aeroportuários não têm sido abordados com tanta facilidade como os relativos a pavimentos rodoviários, pelo que a oportunidade de realizar esta dissertação permite maior divulgação da temática aeroportuária.

A abordagem deste tema com mais profundidade, permitiu aprender e investigar os conhecimentos nesta área, tão específica como são os pavimentos aeroportuários, levando o autor a concluir da importante carência das administrações dos aeroportos, principalmente dos mais pequenos, na componente técnica dos pavimentos.

Sabendo os requisitos normativos internacionais necessários para a determinação do PCN, é importante criar princípios e documentos claros e precisos que sirvam de apoio a esta determinação, pelo que este trabalho pretende contribuir para esse fim.

Focando no tema da dissertação, nomeadamente dos pavimentos em aeródromos e aeroportos, a Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO) criou um grupo de estudo para desenvolver um método internacional de forma a descrever as características do pavimento. Estes, adotaram o Número de Classificação do Avião - Método da Classificação Numérica do Pavimento (ACN-PCN).

É possível distinguir as duas siglas que dão nome ao método ACN- PCN. O ACN (Número de Classificação do Avião) é o efeito de um avião em diferentes pavimentos com um único

número, que varia de acordo com o peso e a configuração do avião (por exemplo, pressão dos pneus, geometria do trem de aterragem, etc), tipo de pavimento, e a capacidade de carga da fundação, para 10000 recobrimentos. Por outro lado, o PCN (Número Classificação do Pavimento) pode definir-se como a capacidade de carga de um pavimento, expressa por um único número, sem especificar um avião particular ou informações detalhadas acerca da estrutura do pavimento.

Sem suma, ACN é um número que expressa o efeito relativo de um avião com uma determinada configuração em uma estrutura de pavimento, e PCN é um número que expressa a capacidade de carga de um pavimento para operações sem que ocorram restrições.

Relativamente ao sistema do ACN-PCN, este está estruturado de modo a que o pavimento com um determinado valor de PCN pode suportar um avião com um valor de ACN igual ou inferior do valor do PCN do pavimento. Isso é possível porque os valores do ACN e do PCN são calculados usando a mesma base técnica.

Para um pavimento em particular, a determinação do PCN pode basear-se em dois procedimentos, utilizando: i) o método do avião; ou ii) o método de avaliação técnica. Os procedimentos da ICAO permitem aos estados membros saber como determinar os valores do PCN, determinados com base nos procedimentos de avaliação de pavimentos.

## **1.2. Objetivo**

Esta dissertação tem como objetivo principal apresentar a metodologia de cálculo do PCN dos pavimentos flexíveis aeroportuários baseados no método empírico da Federal Aviation Administration (FAA).

Como objetivo específico, a dissertação pretende determinar o PCN através do método da FAA e ao método empírico-mecanicista para o caso do Aeródromo Municipal de Bragança.

### **1.3. Estrutura da dissertação**

Esta dissertação está estruturada em 4 capítulos, sendo que no presente capítulo apresenta-se o tema em estudo, o objetivo geral e específico, e a estrutura do trabalho.

O capítulo 2 tem como objetivo, apresentar e descrever a determinação do PCN com base no método da FAA e no método empírico-mecanicista para pavimentos aeroportuários.

No Capítulo 3 efetua-se a apresentação do caso de estudo desta dissertação, o Aeródromo Municipal de Bragança, com a sua histórica e caracterização do pavimento na situação atual. Seguidamente demonstra-se a aplicação do método FAA e a utilização do método empírico-mecanicista, com os procedimentos estudados no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). São ainda apresentados os resultados obtidos em todas as fases, discutindo e comparando esses mesmos resultados.

No capítulo 4 faz-se a conclusão desta dissertação, com a discussão dos resultados analisados e apresenta-se as conclusões obtidas ao longo do desenvolvimento deste estudo.



## 2. PROCEDIMENTOS DE AVALIAÇÃO DO PCN

### 2.1. Método ACN-PCN

O Método ACN-PCN, do inglês “*Aircraft Classification Number*” e “*Pavement Classification Number*”, surgiu em 1977, formulado por um grupo de estudo da Organização de Aviação Civil Internacional (ICAO) com a finalidade de elaborar um método simples para registrar a resistência dos pavimentos (Fonseca, 2013).

Antes da apresentação do método importa definir o significado técnico das siglas que lhe dão a designação. Assim,

- ACN: efeito de um avião num pavimento representado através de um único número, que varia de acordo com o peso e configuração do avião, tipo de pavimento e a capacidade de carga da fundação;
- PCN: número que indica a resistência de um pavimento para poder ser utilizado sem restrições por aviões com ACN menor que o PCN da pista.

O sistema ACN-PCN é estruturado de maneira que um pavimento com um determinado valor de PCN seja capaz de suportar, sem restrições um avião que tenha um valor de ACN inferior ou igual ao valor do PCN do pavimento (ANAC, 2008).

As condições de aplicação da metodologia ACN-PCN são as seguintes:

- A metodologia aplica-se nos aeroportos com pavimentos cuja capacidade de carga, ou cujas carga dos aviões que o solicitam, sejam superiores a 5700 kg;
- No caso mencionado anteriormente devem ser ponderados os dois valores seguintes, relativos aos aviões:
  - O valor máximo da carga permitido;
  - O valor máximo da pressão de enchimento dos pneus admitido.

O objetivo do método ACN-PCN é a difusão de dados sobre a resistência dos pavimentos de forma que a Administração Aeroportuária Local (AAL) possa avaliar a possibilidade de utilização do pavimento para um determinado tipo de avião.

Na norma AC 150/5335-5A estão especificados todos os conceitos e especificações referentes ao sistema ACN-PCN. O PCN encontra-se definido em português no Decreto-Lei nº 186/2007 e no documento Aerodrome Design Manual – Part 3 da ICAO.

O método de ACN-PCN não é um método de avaliação, pois a documentação do ICAO deixa muito claro que o PCN é simplesmente o ACN do avião mais prejudicial que pode usar o pavimento de forma regular (Lalyre, 2012).

## **2.2. Determinação do ACN**

### **2.2.1. Introdução**

Para determinação do ACN, utilizam-se dois modelos matemáticos (ANAC, 2008):

- Para pavimentos rígidos utiliza-se a solução de *Westergaard*, baseada numa placa elástica carregada sobre uma sub-base de *Winkler* (caso de carga interior), assumindo uma tensão de trabalho para o betão de 2,75 MPa;
- Para pavimentos flexíveis é usado o método do Índice de Suporte Californiano (CBR), que emprega a solução de *Boussinesq*, baseada nos esforços e deslocamentos num semi-espaço isotrópico e homogêneo.

Para facilitar a determinação do ACN, a Administração da Aviação Civil (FAA) desenvolveu o *software* COMFAA que calcula os valores de ACN a partir das especificações da ICAO. Apesar de esse *software* ser útil na determinação do ACN, cabe ao fabricante fornecer os valores oficiais de ACN dos aviões (Fonseca, 2013). Além do ACN, o programa COMFAA determina também os valores de PCN de cada avião em estudo.

### **2.2.2. Aplicação**

Dado que um avião opera em diversas condições de massa e centro de gravidade, nos cálculos do ACN adotam-se as seguintes convenções:

- O ACN máximo dum avião calcula-se com a massa e centro de gravidade que provocam a carga máxima do trem de aterragem principal sobre o pavimento; geralmente, trata-se da máxima carga sobre a plataforma. Para este caso, considera-se que os pneus do avião têm a pressão de enchimento que está de acordo com a recomendação dos fabricantes;
- O fabricante do avião deve fornecer o valor oficial do ACN, de acordo com informações detalhadas sobre as características operacionais do avião;

Existem inúmeras tabelas de onde é possível retirar o valor do ACN dos aviões. Este aparece em função da massa do avião, da pressão dos pneus e da categoria do solo de fundação. Um exemplo dessas tabelas encontram-se no Anexo 1.

## **2.3. Determinação do PCN**

### **2.3.1. Introdução**

A avaliação do PCN dos pavimentos aeroportuários é uma obrigação das autoridades aeronáuticas de cada país.

De acordo com a norma AC 150/5335-5A da FAA existem dois métodos para calcular o valor numérico do PCN, sendo um baseado na experiência com aviões que operam usualmente no pavimento e outro que se baseia em avaliação técnica (ANAC, 2008).

O método experimental é um procedimento simples onde os valores de ACN de todos os aviões usualmente autorizados a utilizar o pavimento são determinados e o maior destes valores é notificado como o valor do PCN do pavimento. Este método é fácil de ser aplicado e não necessita de conhecimento detalhado da estrutura do pavimento (ANAC, 2008).

No método da avaliação técnica são usados os mesmos princípios usados para projeto de pavimentos, sendo determinado o valor numérico do PCN a partir da obtenção da carga máxima

admissível que o pavimento suporta (ANAC, 2008). Obtida a carga admissível, a determinação do valor do PCN torna-se um processo simples de aquisição do ACN do avião que apresenta a carga admissível, tomando-se este valor como o PCN do pavimento.

A ICAO não especifica a metodologia que deve ser utilizada para a definição do PCN. Cabe aos estados ou às autoridades aeroportuárias determinarem o PCN utilizando o método preferido (Alexandre, 2008).

### 2.3.2. Procedimentos para notificação do PCN

O PCN é expresso num código de cinco parte, descrevendo o pavimento em causa (Lalyre, 2012), onde o significado de cada parte corresponde ao:

- Valor numérico do PCN;
- Tipo de pavimento;
- Categoria de resistência da fundação;
- Pressão máxima permitida nos pneus;
- Método de avaliação utilizado.

O valor numérico do PCN deve ser apresentado em números inteiros, arredondando-se as frações para o inteiro mais próximo.

Existem tabelas de referências com os valores das quatro categorias do solo de fundação, para pavimentos flexíveis e rígidos. Estas quatro categorias definem-se de acordo como o tipo de pavimento, como se verifica na Tabela 2.1 e Tabela 2.2. A fundação dos pavimentos é caracterizada através do CBR no caso de pavimentos flexíveis e pelo módulo de reação (k) no caso de pavimentos rígidos.

Tabela 2.1 - Condições para pavimentos rígidos para cálculo do PCN (INAC, 2012)

<b>Categoria da resistência da fundação</b>	<b>Capacidade de suporte da fundação (k) – Valor em psi (MN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Intervalo de valores de k em psi (MN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Código de designação</b>
Alta	552,6 (150)	$k > 442$ (120)	A
Média	294,7 (80)	$221 < k < 442$ ( $60 < k < 120$ )	B
Baixa	147,4 (40)	$92 < k < 221$ ( $25 < k < 60$ )	C
Muito Baixa	73,7 (20)	$k < 92$ (25)	D

Tabela 2.2 - Condições para pavimentos flexíveis para cálculo do PCN (INAC, 2012)

<b>Categoria da resistência da fundação</b>	<b>CBR - Valor tipo</b>	<b>Intervalo de valores do CBR</b>	<b>Código de designação</b>
Alta	15	CBR > 13	A
Média	10	8 < CBR < 13	B
Baixa	6	4 < CBR < 8	C
Muito Baixa	3	CBR < 4	D

A categoria de um avião equivalente é apresentado através da pressão dos pneus, em vez do tipo de pavimento. Contudo, em aplicação, a pressão difere substancialmente para pavimentos flexíveis e rígidos.

O sistema PCN usa quatro categorias para notificação da pressão admissível de pneus, estando estas apresentadas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Códigos da pressão dos pneus para o relatório do PCN (AC 150/5335-5A, 2006)

<b>Categoria de pressão de enchimento dos pneus</b>	<b>Código de designação</b>	<b>Pressão</b>
Alta	W	Sem limite
Média	X	Pressão limitada a 218 psi (1,5 MPa)
Baixa	Y	Pressão limitada a 145 psi (1,0 MPa)
Muito Baixa	Z	Pressão limitada a 73 psi (0,5 MPa)

Para pavimentos rígidos, a pressão dos pneus tem pouco efeito. Os pavimentos rígidos são capazes de absorver altas pressões de pneus, sendo classificados normalmente com o código W (ANAC, 2008).

O valor numérico do PCN é uma indicação relativa da resistência de um pavimento em termos de uma carga, a uma pressão de pneus normalizada (1,25 MPa) (ANAC, 2008) e quatro categorias de resistência da fundação (Tabela 2.3).

Além da pressão dos pneus e das categorias de resistência da fundação, o pavimento é considerado em dois tipos: pavimentos flexíveis e pavimentos rígidos, com a designação demonstrada na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Tipo de pavimento

<b>Tipo de pavimento</b>	<b>Código de designação</b>
Flexível	F
Rígido	R

Diferentes combinações de tipos de pavimentos podem resultar em um pavimento complexo que se classifica entre um pavimento flexível e um pavimento rígido, sendo chamado de pavimento composto. Este tipo de pavimento também deve ser codificado como flexível e a sua notificação de PCN deve apresentar uma observação informando que se trata de construção composta (ANAC, 2008).

O sistema PCN reconhece dois métodos de avaliação de pavimento. Se a avaliação resulta do resultado de um estudo técnico, o método de avaliação deve ser codificado com a letra T. Se a avaliação é baseada na experiência com aviões que operam usualmente no pavimento, o método de avaliação deve ser codificado com a letra U (ANAC, 2008).

De forma a explicar melhor os códigos associados ao PCN, um PCN cujo código seja 45/F/B/X/T corresponde a um pavimento com capacidade de carga de valor numérico 45, de um pavimento flexível (F), cuja fundação é de categoria média, com valores de CBR entre os 8 e os 13 (B), com pressão máxima de enchimento de pneus admissível igual a 1,5 MPa (X) e cuja avaliação foi técnica (T).

Depois de apresentada a codificação associada ao PCN, torna-se necessário conhecer os passos para determinar o PCN através da norma AC 150/5335-5A que tempemlam:

1. Identificar as propriedades do pavimento;
2. Determinar a composição do tráfego;
3. Calcular a espessura equivalente e identificar o avião individualmente;
4. A maior espessura equivalente identifica o avião crítico;
5. Converter o tráfego para tráfego de avião crítico equivalente;
6. Determinar o peso máximo operacional permitido pelo avião crítico;
7. Determinar o ACN do avião crítico no seu peso operacional máximo permitido;
8. Referir o PCN com o ACN obtido no passo 7.

## 2.4. Método da FAA utilizando o programa de cálculo COMFAA

Nesta parte da dissertação será apresentado um exemplo do cálculo do PCN recorrendo ao programa de cálculo COMFAA, para um pavimento rígido, sendo que para os pavimentos flexíveis, o procedimento é explicado no Capítulo 3. O exemplo utiliza os dados apresentados no artigo “Calculating PCN using the FAA Method” elaborado por DeBord (2012).

O aeroporto em estudo tem duas pistas, onde uma é constituída por pavimento flexível e outra por pavimento rígido. Ambas as pistas possuem o mesmo tráfego e ano de construção.

### 2.4.1. Tráfego anual e propriedades do pavimento

O tráfego médio anual existente para o caso de estudo que se apresenta encontra-se na Tabela 2.5. Na pista com pavimento rígido passa 60% do tráfego e na pista com o pavimento flexível passa os restantes 40% do tráfego.

Tabela 2.5 - Tráfego anual

Tipo de avião	Tipo de trem de aterragem	Partidas médias anuais	Tipo de pavimento	
			Rígido	Flexível
B747-400ER	2D/2D2	3800	2280	1520
B747-8	2D/2D3	300	180	120
B787-8	2D	6800	4080	2720
B717	D	6100	3660	2440
B727-200	D	200	120	80
B737 (300/400/500)	D	22000	13200	8800
B737 (700/800)	D	26000	15600	10400
B757-200	2D	41000	24600	16400
B767-300ER	2D	7800	4680	3120
B777-300ER	3D	3300	1980	1320
MD-11ER	2D/D1	1200	720	480
MD-83	D	700	420	280
A319	D	12000	7200	4800
A320	D	19000	11400	7600
A321	D	5500	3300	2200

Tipo de avião	Tipo de trem de aterragem	Partidas médias anuais	Tipo de pavimento	
			Rígido	Flexível
A300/310	2D	2100	1260	840
A340-200	2D	800	480	320
A380-800	2D/3D2	500	300	200

Para se determinar o valor do PCN, é importante ter acesso às propriedades mais relevantes da pista. Para uma melhor análise do pavimento rígido, estas propriedades encontram-se na Tabela 2.6. Nesta tabela encontram-se também as unidades e códigos denominados pela FAA 5010 em relação ao tipo de pavimento utilizado na pista.

Tabela 2.6 - Propriedades do pavimento da pista (pavimento rígido)

<b>Data de construção</b>	2011	
<b>Pavimento Rígido (Betão de cimento)</b>	17 in.	P-501
<b>Camada de base</b>	6 in.	P-306
<b>Módulo de elasticidade da camada betuminosa</b>	4000000 psi	
<b>Módulo de rotura</b>	700 psi	
<b>Módulo de reação do terreno de fundação - k</b>	193 pci	
<b>Valor efetivo do módulo de reação k</b>	310 pci	Código B
<b>Vida útil restante (anos)</b>	20	
<b>Classificação FAA 5010</b>	D220; DT400; DDT800	

Sabendo a espessura e constituição do pavimento, verifica-se a necessidade de ajustar os fatores de equivalência do pavimento existente, para um pavimento equivalente com constituição recomendada. Estes fatores de equivalência encontram-se na Figura 2.1.

Structural Item	Description	Range Convert to P-209	Recommended Convert to P-209	Range Convert to P-154	Recommended Convert to P-154
P-501	Portland Cement Concrete (PCC)	--	--	--	--
P-401	Plant Mix Bituminous Pavements (HMA)	1.2 to 1.6	1.6	1.7 to 2.3	2.3
P-403	Plant Mix Bituminous Pavements (HMA)	1.2 to 1.6	1.6	1.7 to 2.3	2.3
P-306	Econocrete Subbase Course (ESC)	1.2 to 1.6	1.2	1.6 to 2.3	1.6
P-304	Cement Treated Base Course (CTB)	1.2 to 1.6	1.2	1.6 to 2.3	1.6
P-212	Shell Base Course	--	--	--	--
P-213	Sand-Clay Base Course	--	--	--	--
P-220	Caliche Base Course	--	--	--	--
P-209	Crushed Aggregate Base Course	1.0	1.0	1.2 to 1.6	1.4
P-208	Aggregate Base Course	1.0	1.0	1.0 to 1.5	1.2
P-211	Lime Rock Base Course	1.0	1.0	1.0 to 1.5	1.2
P-301	Soil-Cement Base Course	n/a	--	1.0 to 1.5	1.2
P-154	Subbase Course	n/a	--	1.0	1.0
P-501	Portland Cement Concrete (PCC)	Range Convert to P-401 2.2 to 2.5, Recommended 2.5			

Figura 2.1 - Fatores de equivalência dos pavimentos (DeBord, 2012)

No caso do pavimento rígido apresentar camadas de base e/ou sub-base, estas são consideradas no programa COMFAA como englobadas na camada de fundação, uma vez que o programa COMFAA trabalha com apenas uma camada de pavimento sobre a fundação.

Na Figura 2.2 apresenta-se a folha de cálculo EXCEL anexa ao programa COMFAA, na qual observa-se a introdução das espessuras do pavimento existente (coluna E) com os fatores de equivalência P-501, P-306, correspondentes ao tipo de material que o constitui (coluna D). Nesta mesma coluna insere-se também o valor módulo de rotura (Linha 6) e o valor do módulo de reação (k) (Linha 15).

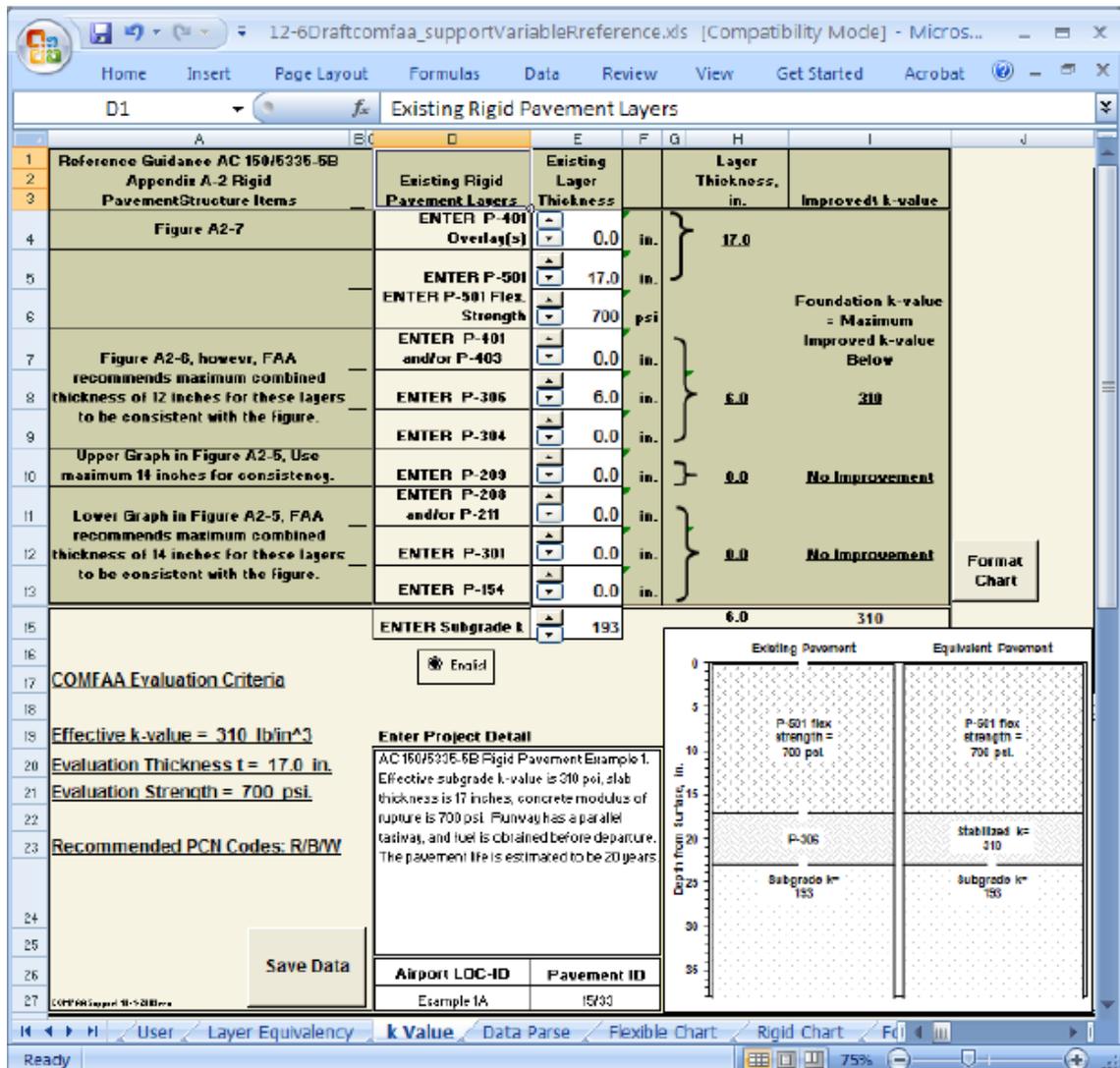


Figura 2.2 - Folha de cálculo EXCEL para cálculo da espessura do pavimento (DeBord, 2012)

### 2.4.2. Cálculo do PCN

Tal como referido anteriormente, o programa COMFAA funciona unicamente para uma camada de pavimento sobre a fundação, pelo que as camadas de base e/ou sub-base têm de ser convertidas no módulo de reação eficaz (k) da fundação. Retira-se este módulo de reação da folha de cálculo EXCEL como “Effective k-value” (Figura 2.2) e entra no programa COMFAA como k (Figura 2.3).

Inseridas todas as características dos aviões, introduz-se o valor do módulo de reação (“Effective k”) e a espessura em avaliação (espessura equivalente) que se retira da folha de

cálculo EXCEL (“Slab Thickness”). Observa-se a introdução destas características na Figura 2.3.

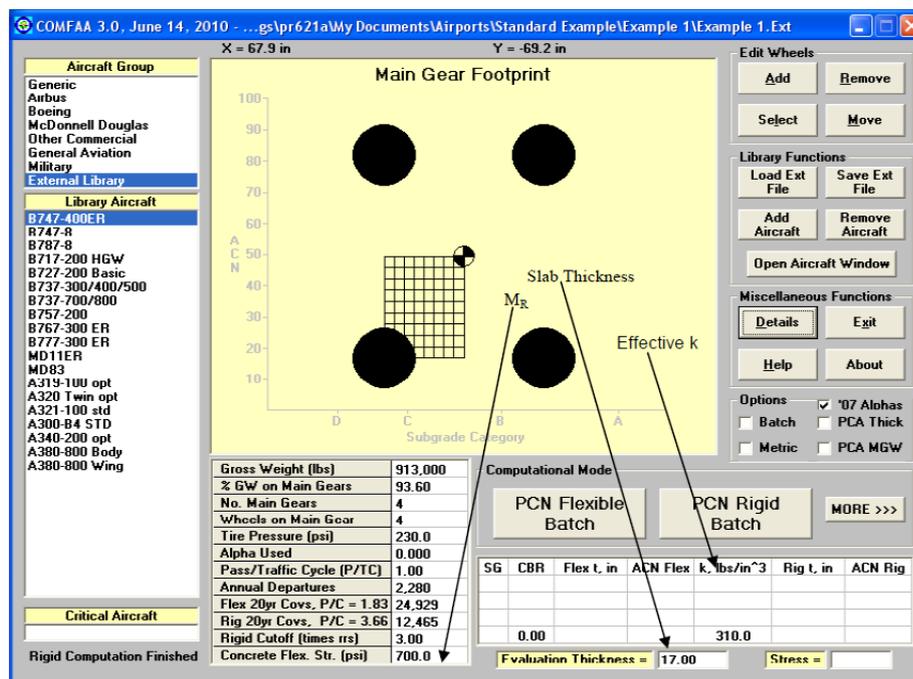


Figura 2.3 - Introdução do módulo de reação e da espessura em avaliação (DeBord, 2012)

Preenchidos todos os campos necessários seleciona-se o botão “Batch”, e pressiona-se no botão “PCN Rigd Batch”. Continuamente, em “Details” são apresentados os resultados.

Inicialmente, como resultados apresentam-se as características do pavimento e do tráfego, juntamente com a categoria da fundação (Figura 2.4).

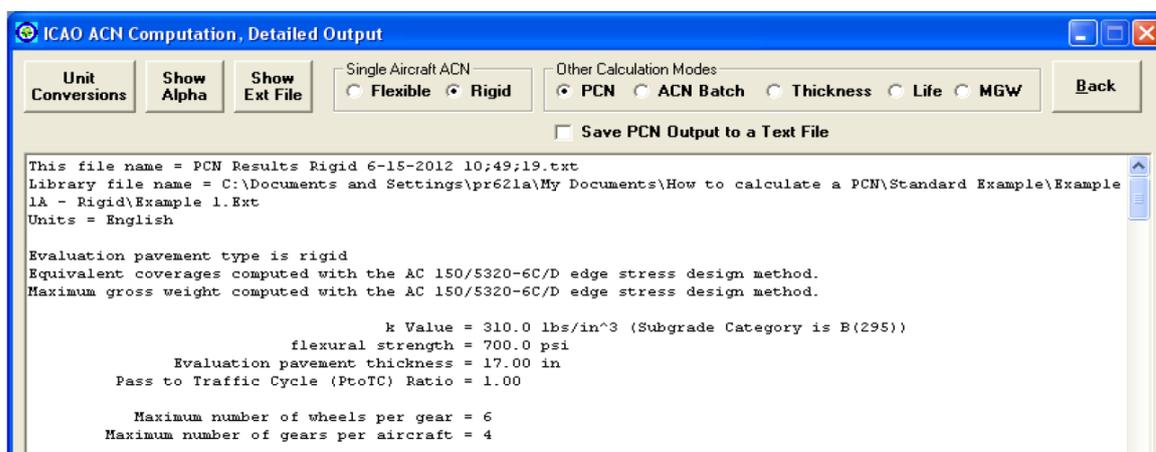


Figura 2.4 - Saída de resultados do programa COMFAA

Seguidamente, apresenta-se os dados de tráfego (Figura 2.5).

Nos dados de tráfego, apresentam-se as espessuras 6D, que são espessuras calculadas individualmente para cada um dos modelos do avião, de acordo com a norma AC150/5320-6D. Estes números não têm qualquer relação com o cálculo PCN e somente são expostos para comparar com a espessura existente. No entanto, espera-se que cada um destes valores seja menor que a espessura existente para um pavimento adequadamente concebido (DeBord, 2012).

Results Table 1. Input Traffic Data

No.	Aircraft Name	Gross Weight	Percent Gross Wt	Tire Press	Annual Deps	20-yr Coverages	6D Thick
1	B747-400ER	913,000	93.60	230.0	2,280	12,465	13.80
2	B747-8	978,000	94.69	218.0	180	1,017	12.78
3	B787-8	503,500	91.28	228.0	4,080	21,268	14.53
4	B717-200 HGW	122,000	94.42	164.0	3,660	20,601	11.78
5	B727-200 Basic	185,200	96.00	148.0	120	826	11.94
6	B737-300/400/500	150,500	93.82	185.0	13,200	74,840	14.05
7	B737-700/800	174,700	93.56	205.0	15,600	87,703	15.32
8	B757-200	256,000	91.18	183.0	24,600	123,813	11.67
9	B767-300 ER	413,000	92.40	200.0	4,680	25,623	13.10
10	B777-300 ER	777,000	92.44	221.0	1,980	10,115	13.09
11	MD11ER	633,000	77.54	206.0	720	3,912	12.79
12	MD83	161,000	94.76	195.0	420	2,456	12.40
13	A319-100 opt	150,800	91.40	200.1	7,200	36,771	13.08
14	A320 Twin opt	172,800	92.80	208.9	11,400	61,448	14.70
15	A321-100 std	181,200	95.60	197.3	3,300	19,011	14.14
16	A300-B4 STD	365,700	94.00	216.1	1,260	6,911	12.03
17	A340-200 opt	515,600	79.98	191.4	480	4,890	11.28
18	A380-800 Body	1,234,500	57.08	218.0	300	1,412	11.20
19	A380-800 Wing	1,234,500	38.05	218.0	300	1,570	12.23

Figura 2.5 - Dados do tráfego

Na Figura 2.6, encontram-se os resultados do PCN, sendo o PCN do pavimento o maior valor verificado para o conjunto de aviões que compõem o tráfego, neste caso o PCN é de 97, correspondendo ao avião B777-300 ER.

O valor do ACN é de 16,92 o qual corresponde ao maior valor de todo o tráfego em estudo. Este ACN corresponde ao avião B777-300 ER.

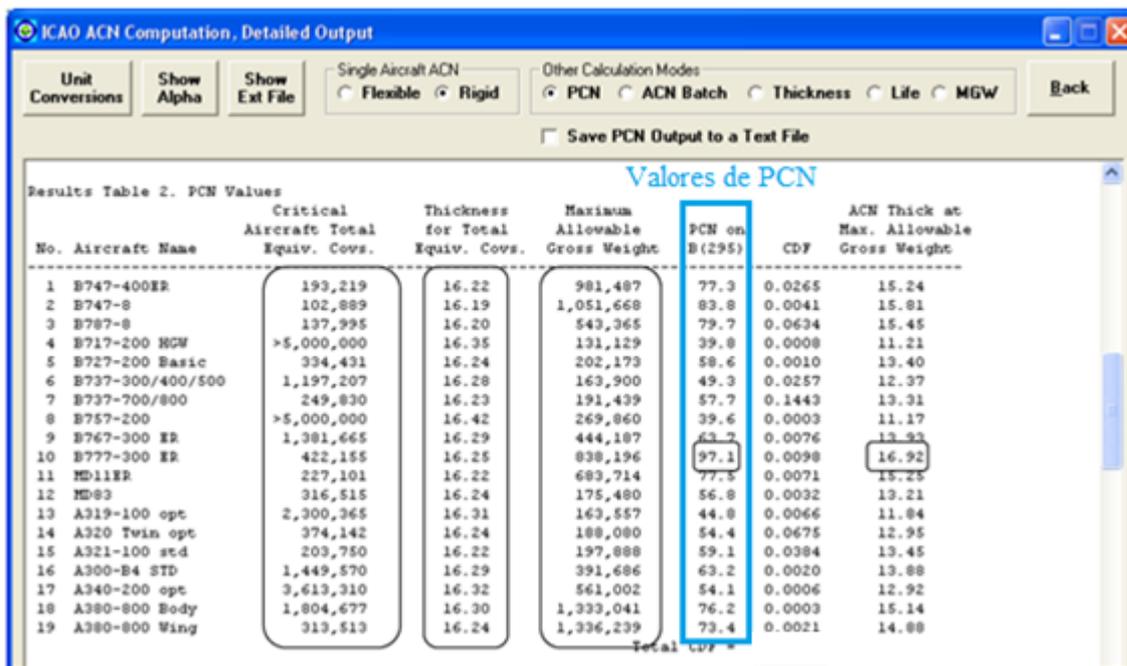


Figura 2.6 - Resultados do programa COMFAA

## 2.5. Método empírico-mecanicista

### 2.5.1. Módulos de deformabilidade

Para a determinação dos módulos de deformabilidade, todos os ensaios efetuam-se nos pavimentos ao longo de alinhamentos paralelos à linha central destes, que devem coincidir com os alinhamentos definidos nos ensaios de defletómetro de impacto. Inicialmente, normalizam-se as deflexões para uma determinada força de pico através da aplicação da equação (2.1):

$$D_n = D_m \times \frac{F_p}{F_m} \tag{2.1}$$

Onde,

$D_n$ : Deflexão normalizada;

$D_m$ : Deflexão medida;

$F_p$ : Força padrão;

$F_m$ : Força medida.

Após a normalização dos valores de deflexão, procede-se a um zonamento com base na observação direta do gráfico das deflexões obtidas ao longo do trecho de estudo e no método das diferenças acumuladas proposto pela AASHTO (Alves, 2007).

Para todas as deflexões medidas, deve determinar-se em quantas zonas o pavimento pode ser dividido em subtrechos homogéneos. Esta subdivisão obtém-se através do método de cálculo das diferenças acumuladas.

Para cada uma das zonas consideradas determina-se os valores das médias e desvios padrão obtidos para as deflexões normalizadas, com base nos quais deve seleccionar-se um ou mais locais cujo comportamento estrutural se considera representativo de cada uma das zonas do pavimento em estudo. Os locais seleccionados dizem respeito a pontos onde se obtém deflexões,  $D_i$ , que se encontram próximas dos valores correspondentes ao percentil 85% (2.2) do conjunto das deflexões medidas em cada zona, dados por:

$$D_i^{85} = M_i + 1,04 \times \sigma_i \quad (2.2)$$

Onde,

$M_i$ : Valor médio das deflexões correspondentes ao transdutor número  $i$ ;

$\sigma_i$ : Desvio padrão.

Seguidamente, utiliza-se os resultados obtidos pelo radar de prospeção. Deve-se executar os ensaios com radar de prospeção, tal como no defletómetro de impacto, ao longo de alinhamentos paralelos à linha central do respetivo pavimento. Após a análise destes resultados, define-se a espessura da camada betuminosa.

Tendo por base os resultados obtidos nos pontos representativos de cada zona do ensaio de carga com defletómetro de impacto e do conhecimento da constituição e espessura das camadas do pavimento, admite-se os módulos de deformabilidade das suas camadas, com recurso à retro-análise do pavimento.

O radar de prospeção (Figura 2.7) é um equipamento que permite estimar em contínuo as espessuras das várias camadas que perfazem a estrutura do pavimento. A grande vantagem deste tipo de equipamento é o facto de permitir, através de um método não destrutivo, obter informação em contínuo sobre a constituição do pavimento.

O radar de prospecção por ser composto por dois pares de antenas suspensas, que emitem ondas eletromagnéticas, por exemplo com frequências de 1,0 GHz e de 1,8 GHz. As antenas com uma maior frequência têm uma melhor resolução, no entanto a onda emitida tem uma profundidade de penetração menor.



Figura 2.7 - Aspeto das antenas do radar de prospecção do LNEC em posição de ensaio

Em cada par de antenas, uma das antenas funciona como emissor e a outra como recetor. Na Figura 2.8 apresenta-se um esquema que traduz o princípio do ensaio com o radar de prospecção. As ondas eletromagnéticas propagam-se verticalmente através das camadas do pavimento, e uma parte é refletida sempre que a onda encontra uma interface entre camadas adjacentes, sendo essa reflexão registada pela antena que serve de recetor.

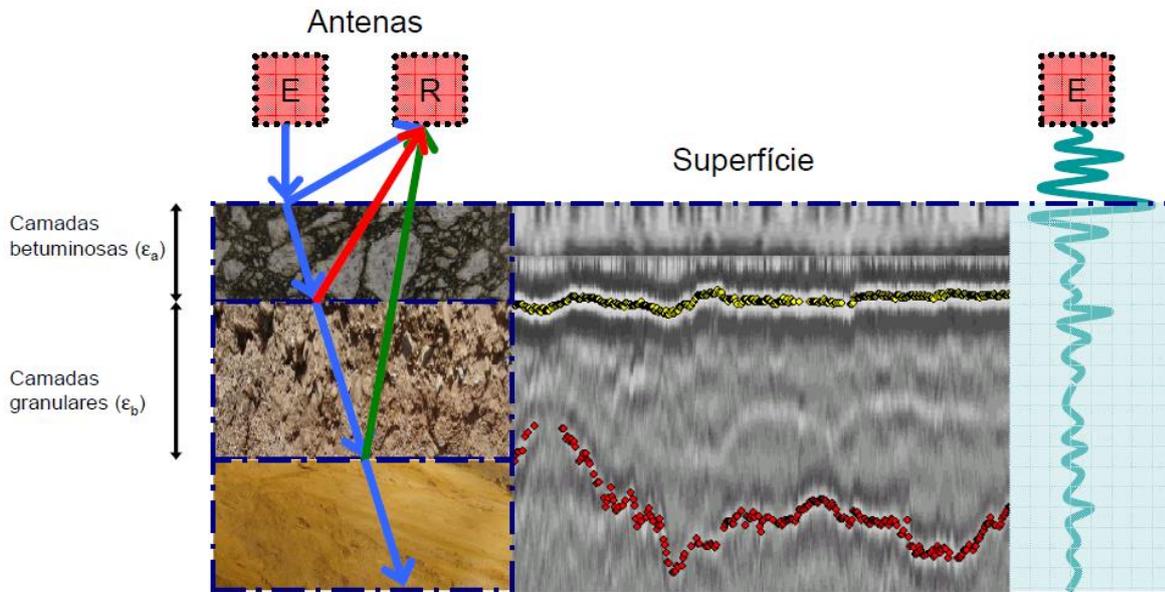


Figura 2.8 - Princípio de funcionamento do radar de prospecção num ensaio em pavimento flexível [adaptado de (Fontul, 2004)]

A velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas depende fundamentalmente da constante dielétrica dos materiais ( $\epsilon$ ). A partir do tempo de percurso ( $t$ ) e da velocidade destas ondas ( $v$ ) de uma determinada camada do pavimento, pode determinar-se a espessura ( $h$ ) dessa camada da seguinte forma (2.3) (Alves, 2007):

$$h = v \times \frac{t}{2} \quad (2.3)$$

Onde:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ : Velocidade da luz no vácuo;

$\epsilon_r$ : Constante dielétrica relativa que tem em conta a combinação dos vários materiais da camada e as condições hídricas (Fontul, 2004).

Admitindo determinados valores típicos para as velocidades de propagação das ondas, ou para as constantes dielétricas dos materiais das camadas, com base no intervalo de tempo decorrido entre a emissão das ondas e a receção das ondas refletidas, é possível determinar as profundidades a que se encontram as diversas interfaces que delimitam as camadas do

pavimento. A partir dos resultados obtidos ao longo de um determinado trecho, é possível determinar desde logo a localização de zonas com estruturas de pavimento distintas. No entanto, com vista à determinação das espessuras das camadas, os resultados obtidos com o radar devem ser posteriormente calibrados com base em resultados de sondagens, uma vez que a constante dielétrica de cada tipo de material pode exibir uma gama de valores relativamente larga, dependendo de fatores como o seu teor em água ou o estado de compactação (Fontul, 2004).

As condições de temperatura na realização do ensaio de carga com o defletómetro de impacto nem sempre são as condições representativas do comportamento estrutural do pavimento ao longo do ano, tendo-se assim de proceder à correção dos módulos de deformabilidade.

Os módulos de deformabilidade das misturas betuminosas variam consideravelmente com a temperatura a que estas camadas se encontram no momento em que se realiza o ensaio. Assim, procede-se à correção dos módulos estimados para as camadas betuminosas tendo em conta a temperatura de cálculo destas camadas, determinada de acordo com a metodologia preconizada pela Shell (SHELL, 1978).

Tendo em vista a determinação da temperatura de cálculo utiliza-se os valores das temperaturas médias mensais do ar na região em estudo, publicados pelo Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica (Serviço Meteorológico Nacional, 1970).

Assim, a correção dos módulos de deformabilidade das camadas betuminosas para a temperatura de cálculo efetua-se através da expressão (2.4) (Antunes, 1993):

$$E_t^{MB} = (1,635 - 0,0317 \times t_{med}) \times E_{20^{\circ}C}^{MB} \quad (2.4)$$

Onde,

$E_t^{MB}$ : Módulo de deformabilidade da mistura betuminosa (MPa);

$t_{med}$ : Temperatura média da mistura betuminosa (°C);

$E_{20^{\circ}C}^{MB}$ : Módulo de deformabilidade da mistura betuminosa para a temperatura de referência de 20°C (MPa).

### 2.5.2. Valor do PCN

Depois de determinar os módulos de deformabilidade corrigidos para a temperatura de cálculo, determina-se o valor da carga máxima admissível.

Para determinar o valor da carga máxima admissível avalia-se os valores das extensões verificadas no pavimento com o programa ELSYPAV/JPav, tendo em conta os critérios de dimensionamento aplicáveis aos pavimentos em estudo.

Este dimensionamento é feito através da limitação do fendilhamento por fadiga das camadas betuminosas através do uso do critério preconizado pela Shell (SHELL, 1978), (2.5):

$$\varepsilon_b = (0,856 \times V_b + 1,08) \times E^{-0,36} \times N^{-0,2} \quad (2.5)$$

Onde,

$V_b$ : percentagem volumétrica de betume;

$E$ : módulo de deformabilidade da mistura betuminosa, em Pascal (Pa);

$\varepsilon_b$  e  $N$ : representam respetivamente a extensão máxima de tração induzida na camada e o correspondente número admissível de aplicações da carga que a induz.

A contribuição da fundação para a formação de deformações permanentes excessivas é dada por Chou (2.6):

$$\varepsilon_s = 0,00539 \times N^{-0,1436} \quad (2.6)$$

Onde,

$\varepsilon_s$ : extensão vertical de compressão no topo da camada do solo de fundação;

$N$ : correspondente número de passagens admissível.

A classificação da resistência da fundação é realizada com base nos resultados obtidos para os módulos de deformabilidade do solo de fundação por retro-análise, adotando-se a expressão preconizada pela Shell (SHELL, 1978), para estimar o CBR da fundação em função do módulo de deformabilidade dos solos,  $E$  (2.7):

$$E \approx 10 \times CBR \quad (2.7)$$

Os valores de PCN devem calcular-se para cada uma das zonas dos pavimentos. De referir que todos os valores de PCN apresentados correspondem à carga máxima admissível do pavimento para 10000 recobrimentos.

### **2.5.3. Exemplo de aplicação do método empírico-mecanicista**

Nesta parte da dissertação apresenta-se os resultados do estudo realizado no LNEC para a caracterização estrutural de um pavimento aeroportuário, com a determinação da sua capacidade de carga e respetiva classificação ACN-PCN, recorrendo ao método empírico-mecanicista.

Para a determinação do PCN analisam-se os resultados do ensaio da capacidade de carga realizados com defletómetro de impacto e ensaios de avaliação da espessura das camadas do pavimento recorrendo ao georadar.

Para a caracterização estrutural dos pavimentos e a respetiva classificação ACN-PCN adota-se a metodologia de análise estrutural composta por:

1ª Fase: Ensaio de carga e medição da temperatura;

2ª Fase: Análise estrutural dos pavimentos e classificação ACN-PCN.

Para o presente caso de estudo, e dado que a 1ª fase já tinha sido realizada, apenas foi desenvolvida a 2ª fase, onde se obteve os resultados tal como a sua análise.

Os pavimentos dos espaços operacionais no Aeroporto em estudo delimitam-se em três grupos:

- Pista;
- Caminhos de circulação;
- Plataformas de estacionamento.

No presente estudo analisa-se os ensaios realizados na pista, em pavimento flexível, constituída por a camada de sub-base em betão pobre, uma camada de base em macadame betuminoso e camada de regularização e desgaste em betão betuminoso. O comprimento total da pista é de 2480 m com largura de 45 m entre bermas.

Analisam-se os elementos disponíveis sobre a constituição do pavimento em estudo, onde se inclui os resultados dos ensaios com radar de prospeção.

Uma vez estabelecida a constituição dos pavimentos de cada uma das zonas definidas, estabelecem-se os modelos de resposta desses pavimentos, tendo como referência os pontos cujas deflexões medidas com defletómetro de impacto se aproximam dos valores correspondentes ao percentil 85% do conjunto das deflexões medidas nessa zona, que considera-se representativos dos respetivos comportamentos estruturais.

Seguidamente, apresenta-se as metodologias adotadas e os resultados obtidos no estabelecimento dos modelos de resposta para os pavimentos da pista em estudo.

### **Resultados dos ensaios de carga**

Nesta parte do trabalho expõe-se e analisa-se os resultados obtidos nos ensaios de carga através do defletómetro de impacto realizados de acordo com a metodologia apresentada em 2.5.1 e 2.5.2.

Os ensaios realizam-se em sete alinhamentos longitudinais, paralelos ao eixo da pista distanciados de 20 m, 10 m e 4 m do eixo da pista e coincidentes com este de acordo com o esquema apresentado na Figura 2.9.

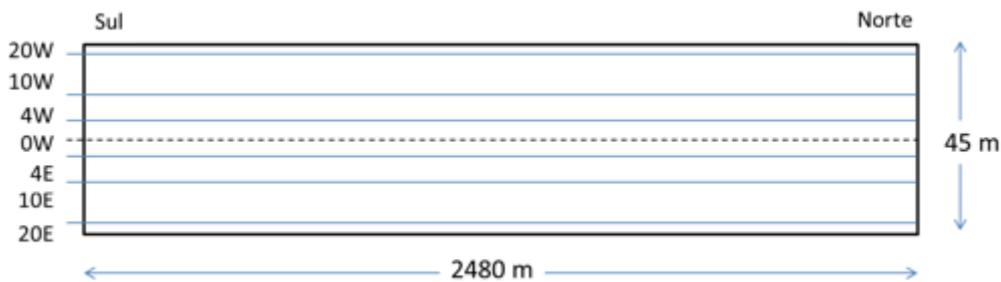


Figura 2.9 - Alinhamentos de ensaio com o defletómetro de impacto

O valor nominal da força de impacto induzida na superfície do pavimento foi de 150 kN, tendo-se utilizado uma placa de carga com 0,45 m de diâmetro. Em cada ensaio mede-se nove deflexões decorrentes da força de impacto, em pontos situados a 0 m; 0,30 m; 0,45 m; 0,60 m; 0,90 m; 1,20 m; 1,50 m; 1,80 m e 2,10 m (que correspondem respetivamente às deflexões

designadas por D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>, D<sub>3</sub>, D<sub>4</sub>, D<sub>5</sub>, D<sub>6</sub>, D<sub>7</sub>, D<sub>8</sub> e D<sub>9</sub>), contados a partir do centro da placa de carga.

### Normalização das deflexões

Nos gráficos seguintes (Figura 2.10, Figura 2.11, Figura 2.12, **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**, Figura 2.14, Figura 2.15 e Figura 2.16) apresenta-se os resultados obtidos nos ensaios realizados, isto é, as deflexões para cada alinhamento, normalizadas para a força de pico de 150 kN.

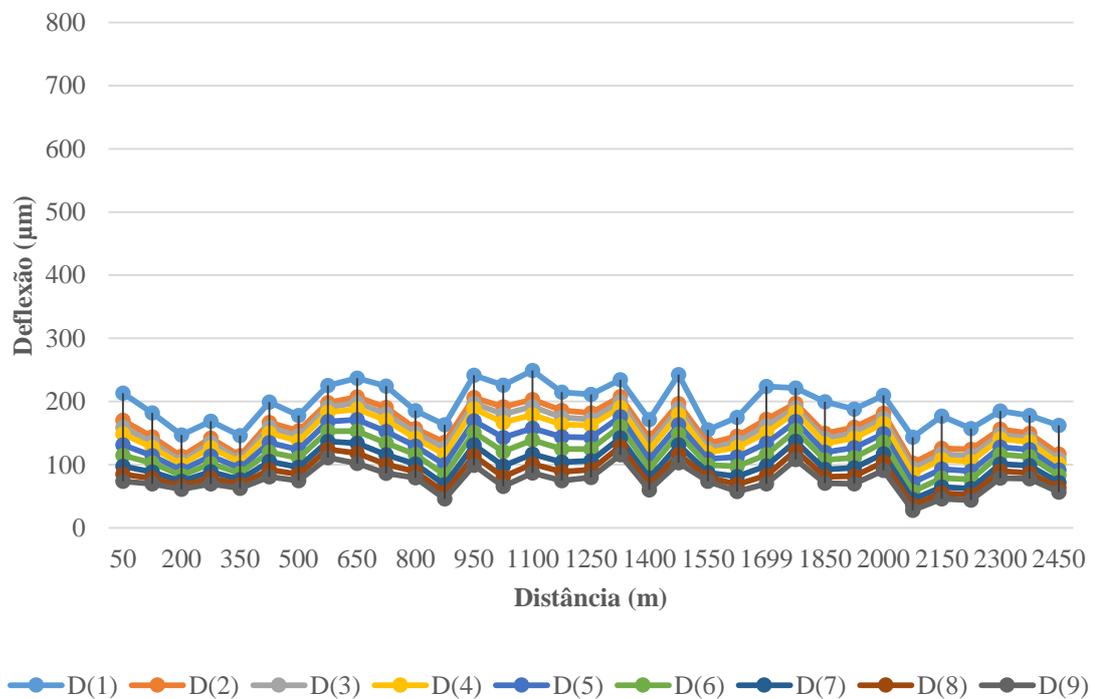


Figura 2.10 - Deflexões normalizadas na pista no alinhamento 20W sentido S-N

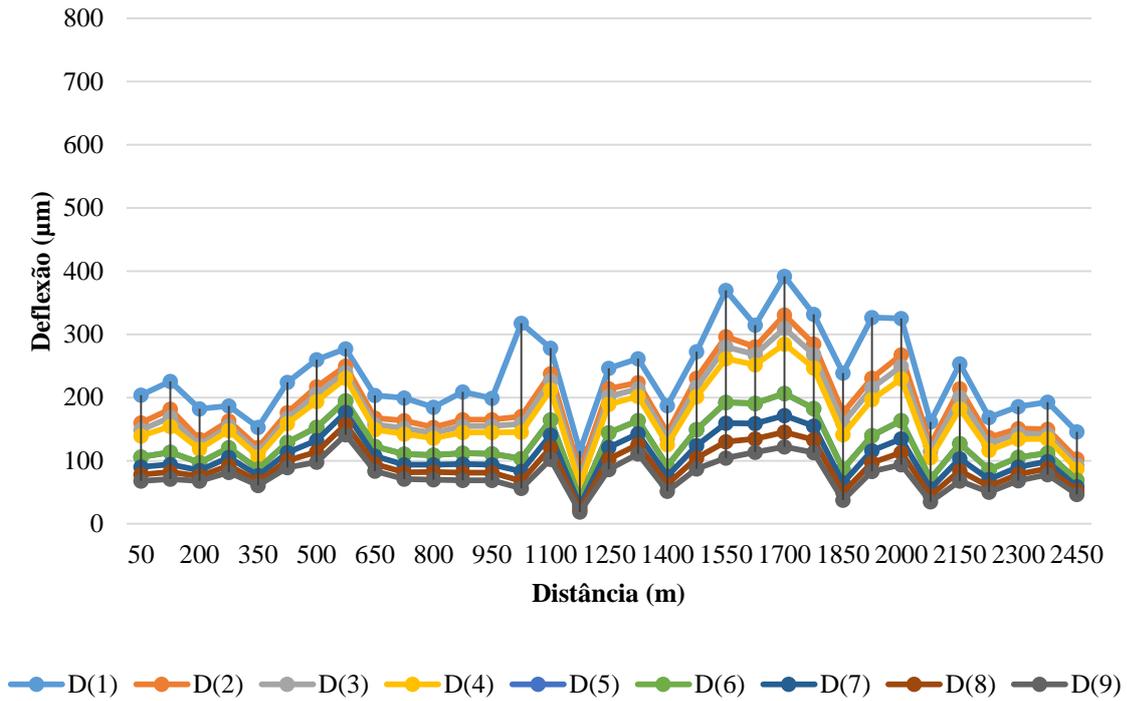


Figura 2.11 - Deflexões normalizadas na pista no alinhamento 10W sentido S-N

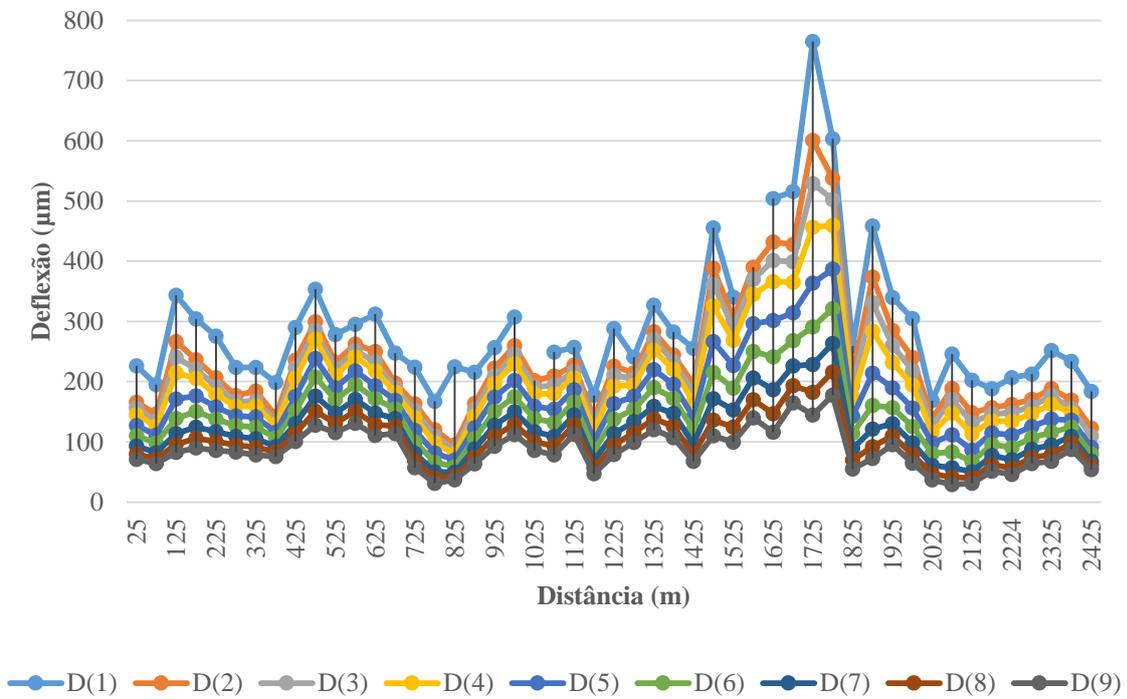


Figura 2.12 - Deflexões normalizadas na pista no alinhamento 4W sentido S-N

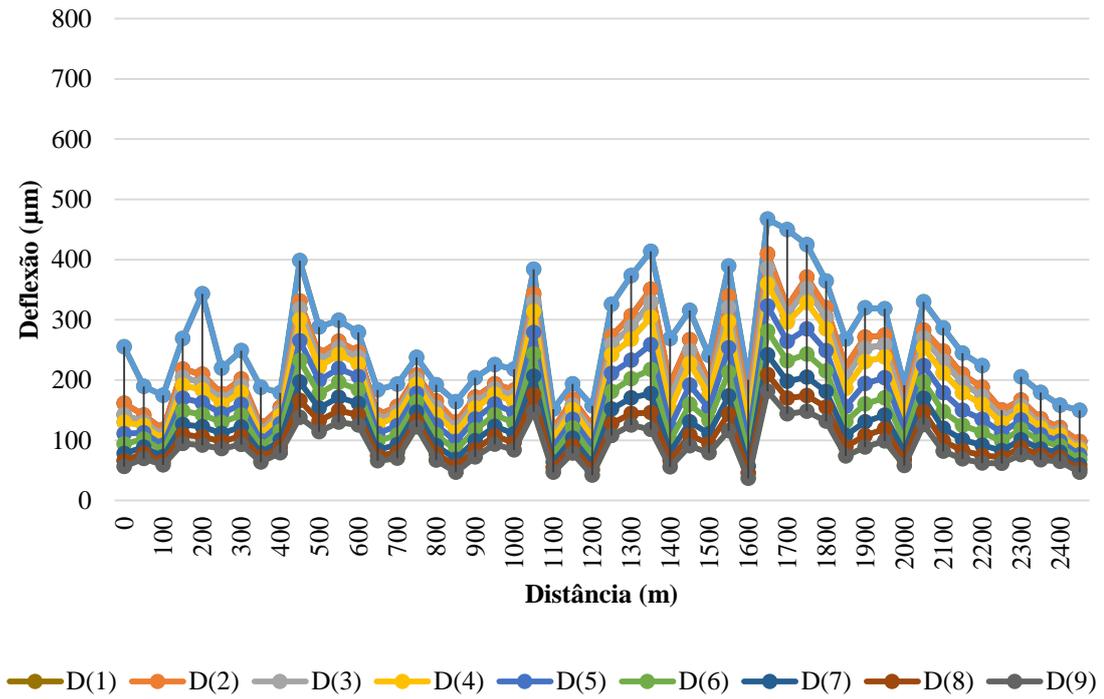


Figura 2.13 - Deflexões normalizadas na pista no alinhamento 0W sentido S-N

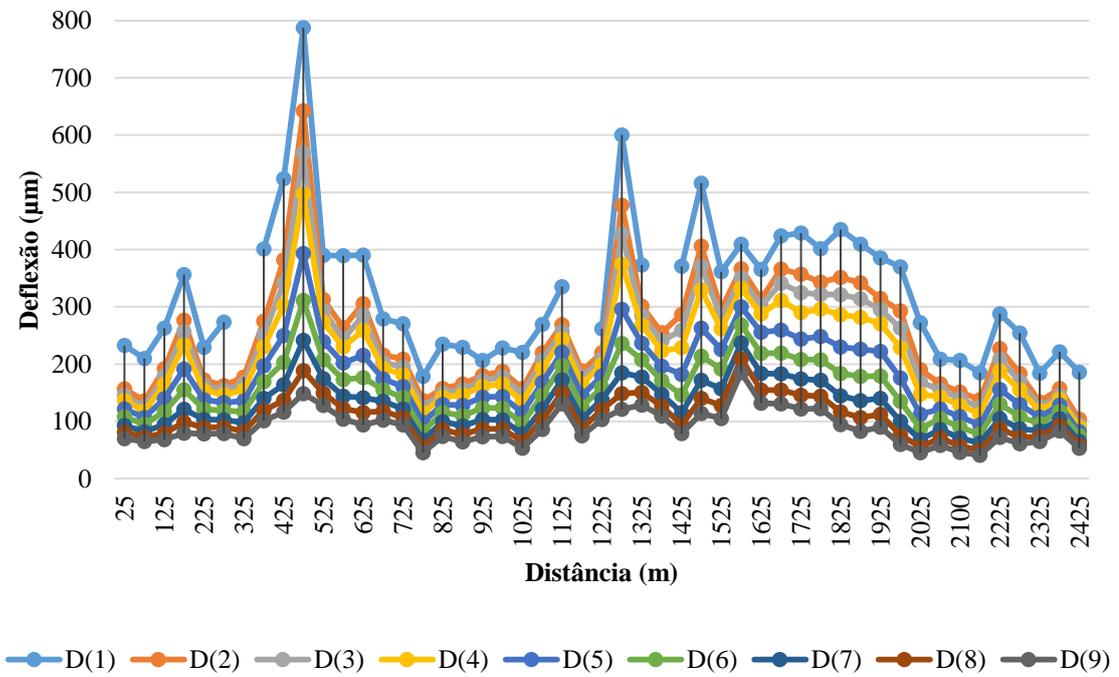


Figura 2.14 - Deflexões normalizadas na pista no alinhamento 4E sentido S-N

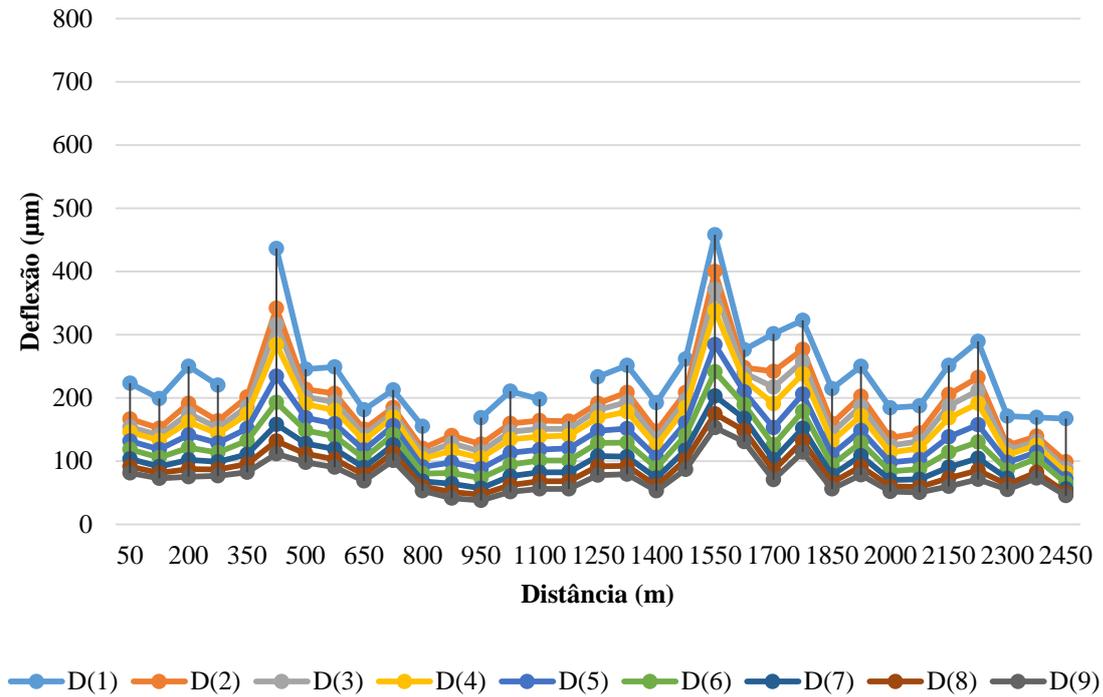


Figura 2.15 - Deflexões normalizadas na pista no alinhamento 10E sentido S-N

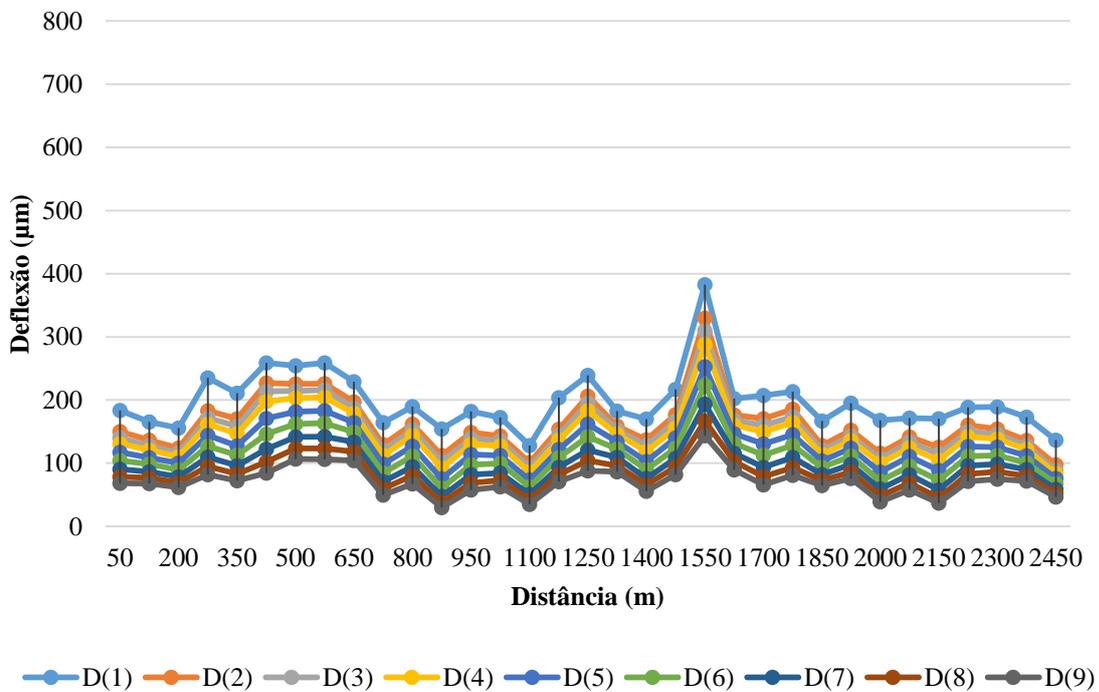


Figura 2.16 - Deflexões normalizadas na pista no alinhamento 20E sentido S-N

## Zonamento

Após a normalização dos valores de deflexão, procede-se a um zonamento com base na observação direta do gráfico das deflexões obtidas ao longo do trecho de estudo e no método das diferenças acumuladas proposto pela AASHTO (AASHTO,1961).

Este método permite a divisão em zonas de comportamento estrutural homogêneo, correspondentes a zonas de diferentes capacidades de carga, e consiste no cálculo, para cada ponto situado à distância  $x$  do início do trecho, da diferença ( $Zx$ ) entre a área acumulada sob o gráfico deflexões/distância ( $Ax$ ) e a área acumulada correspondente ao valor médio das deflexões em todo o trecho ( $\bar{Ax}$ ):  $Zx = Ax - \bar{Ax}$  (Antunes, 1993).

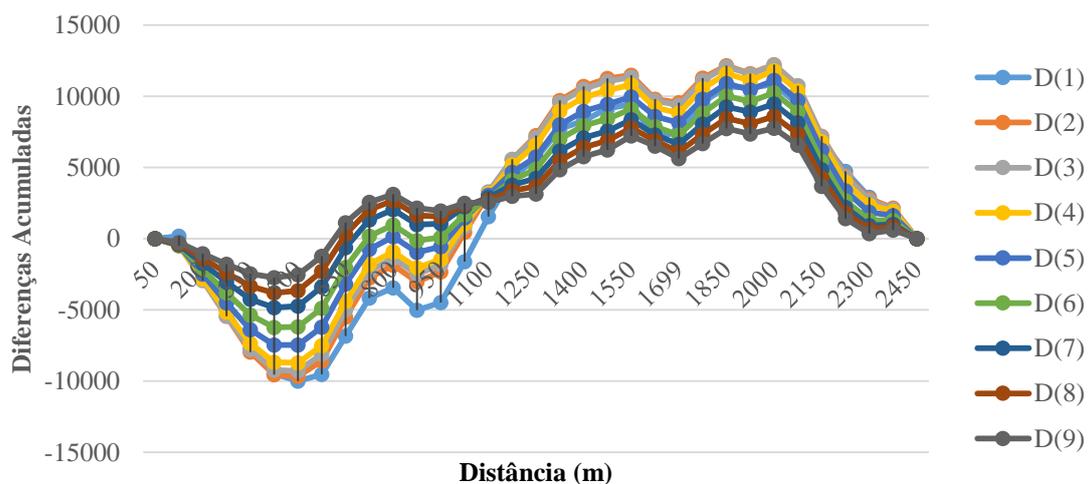


Figura 2.17 – Diferenças acumuladas na pista no alinhamento 20W sentido S-N

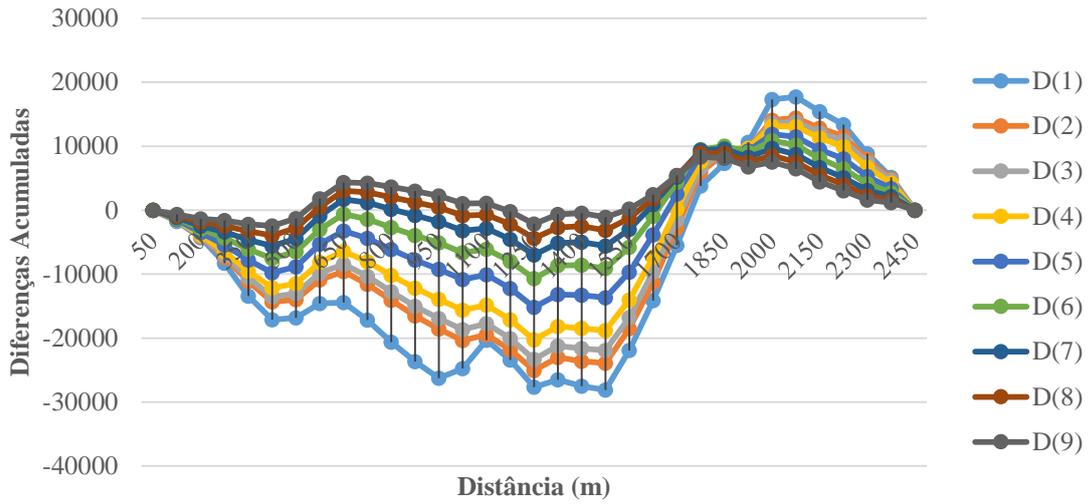


Figura 2.18 - Diferenças acumuladas na pista no alinhamento 10W sentido S-N

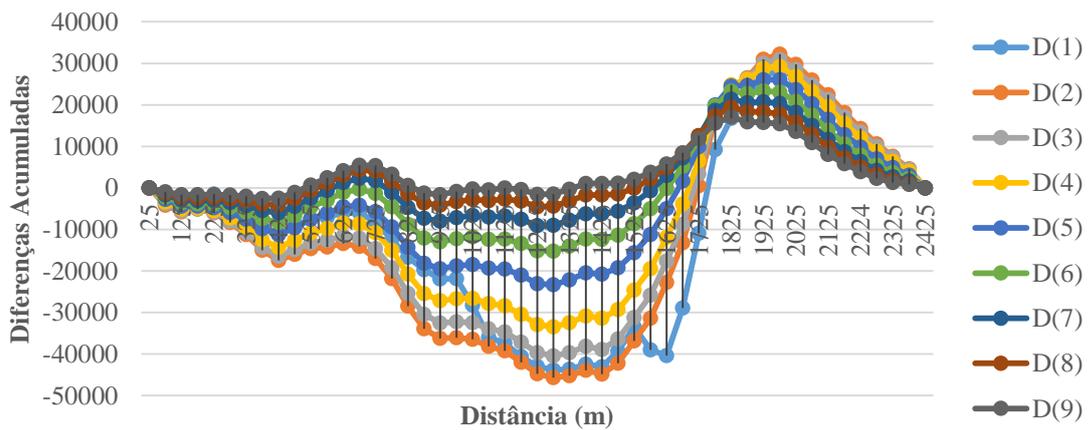


Figura 2.19 - Diferenças acumuladas na pista no alinhamento 4W sentido S-N

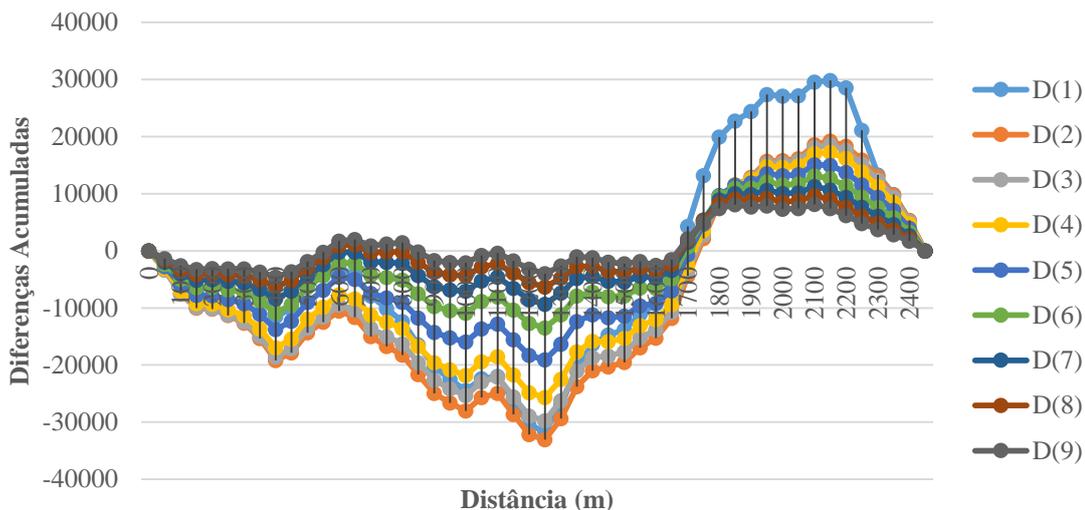


Figura 2.20 - Diferenças acumuladas na pista no alinhamento 0W sentido S-N

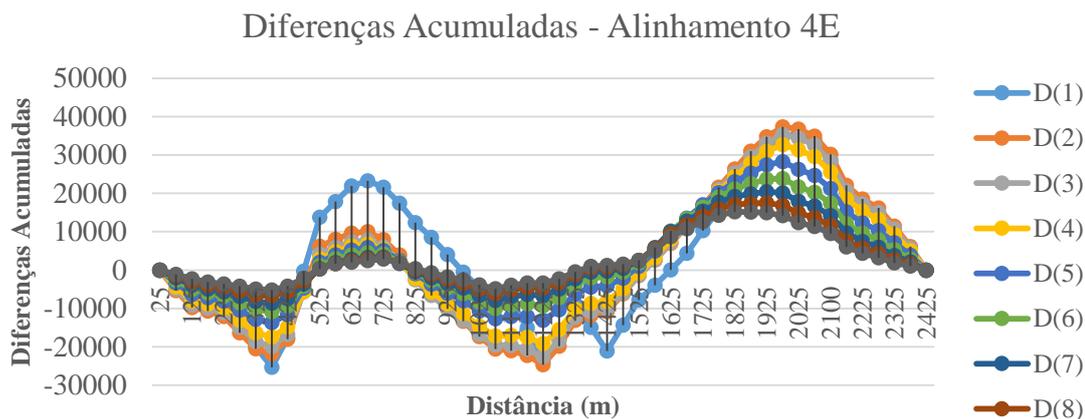


Figura 2.21 - Diferenças acumuladas na pista no alinhamento 4E sentido S-N

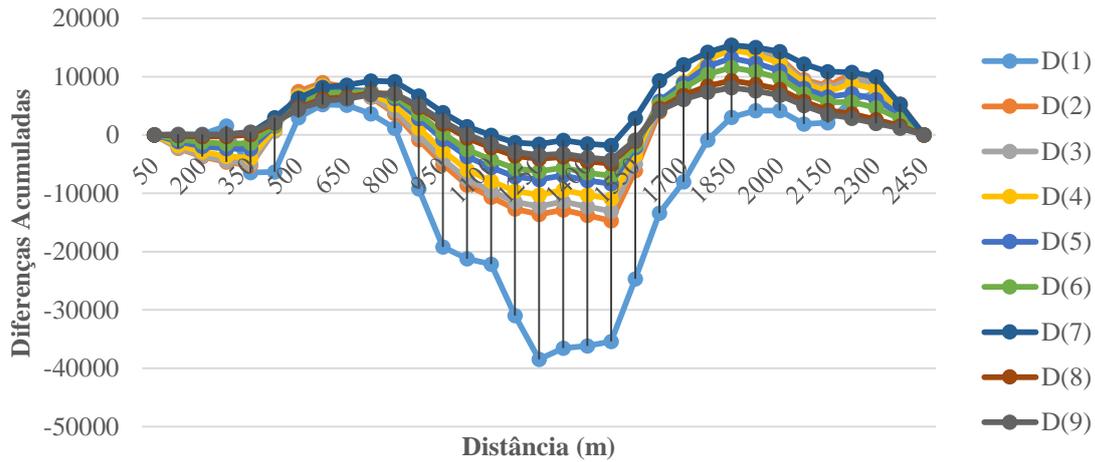


Figura 2.22 - Diferenças acumuladas na pista no alinhamento 10E sentido S-N

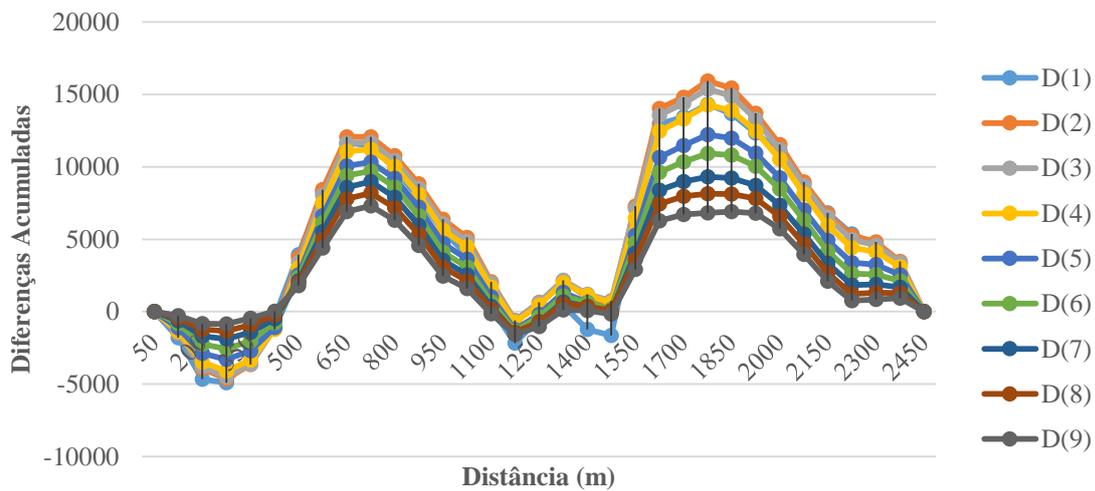


Figura 2.23 - Diferenças acumuladas na pista no alinhamento 20E sentido S-N

O gráfico de  $Z_x$  em função da distância, muda de declive nos pontos em que existe mudança de comportamento (fronteira) permitindo efetuar a divisão do trecho de estudo em zonas (sub-trechos) (Alves, 2007).

Numa primeira abordagem, (de uma forma mais generalista) foram definidas 5 zonas (Zona 1: 0 - 400 m; Zona 2: 400 - 675 m; Zona 3: 700 - 1250 m; Zona 4: 1275 - 2050 m; Zona 5: 2100 - 2450 m), e determinam-se os respetivos valores médios (Figura 2.24, Figura 2.25, Figura 2.26,

Figura 2.27 e Figura 2.28) e o desvio-padrão para cada alinhamento, para uma melhor compreensão das zonas definidas.

Seguidamente determina-se o percentil 85 (2.10) das deflexões obtidas para cada zona, e considera-se que a deformada representativa da zona correspondente a uma probabilidade das deflexões serem excedidas é inferior a 15% (Alves, 2007):

$$D = \bar{D} + 1,04\sigma_D \quad (2.10)$$

Onde:

$\bar{D}$ : Valor médio de deflexão da zona;

$\sigma_D$ : Valor do desvio-padrão.

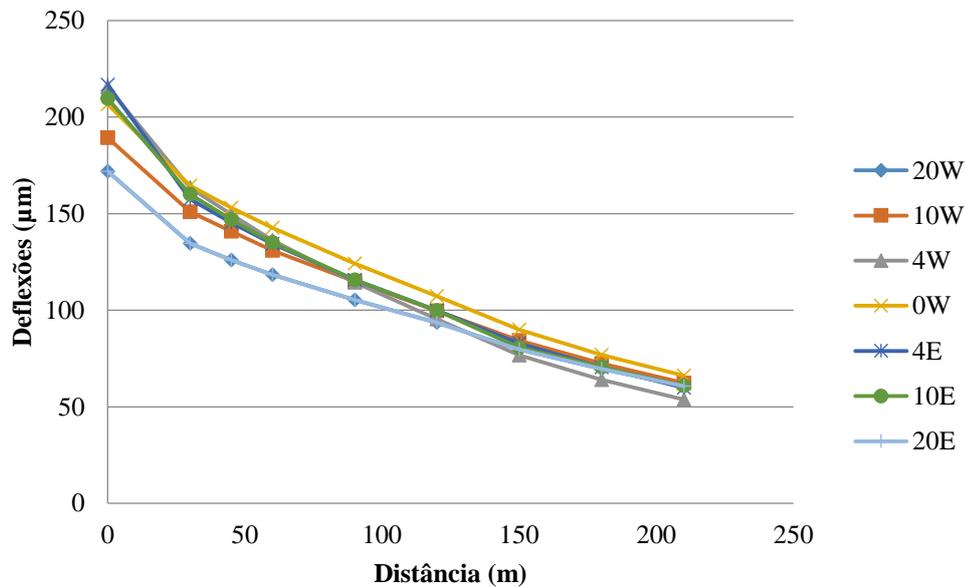


Figura 2.24 - Defletogramas médios da zona 1

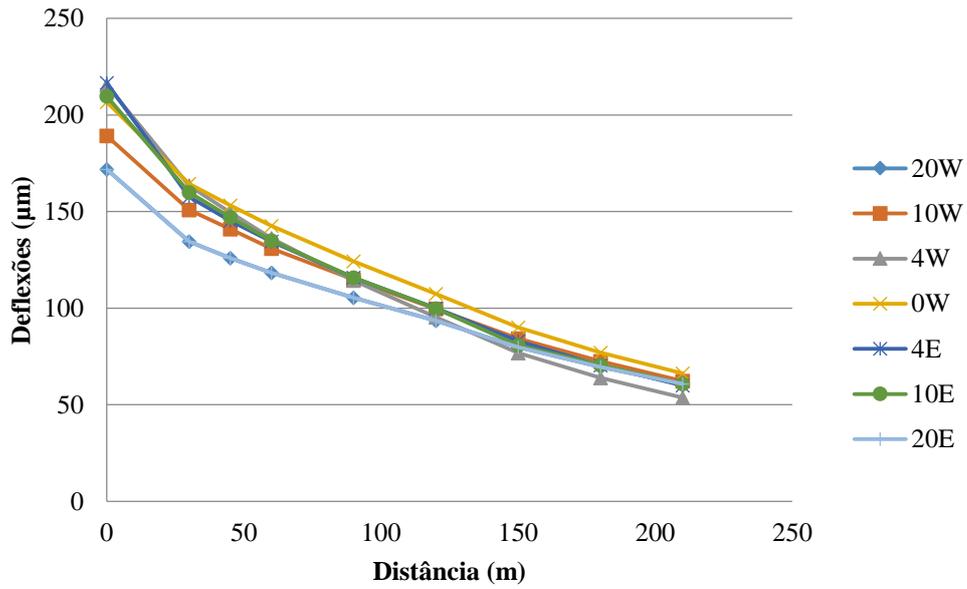


Figura 2.25 - Defletogramas médios da zona 2

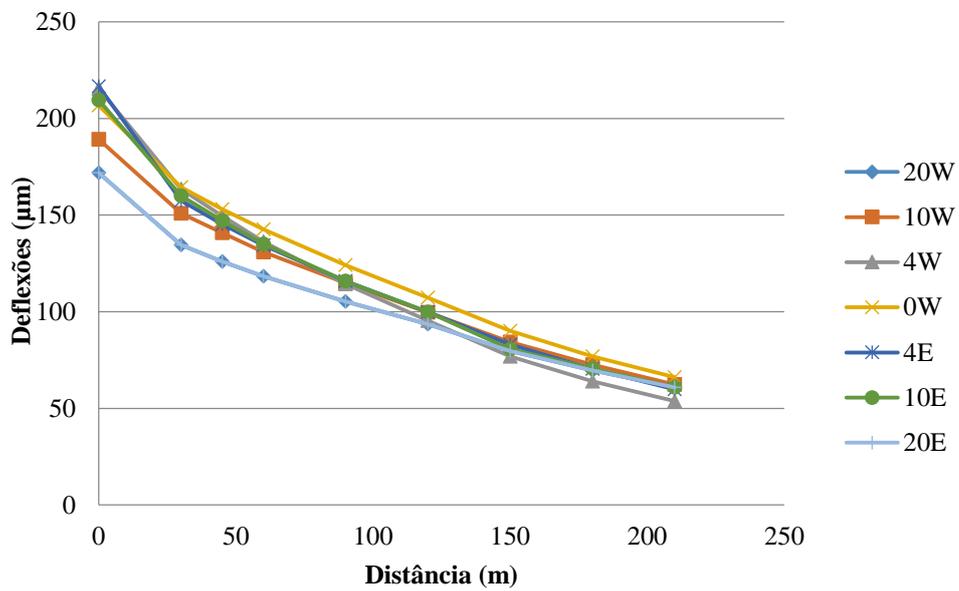


Figura 2.26 - Defletogramas médios da zona 3

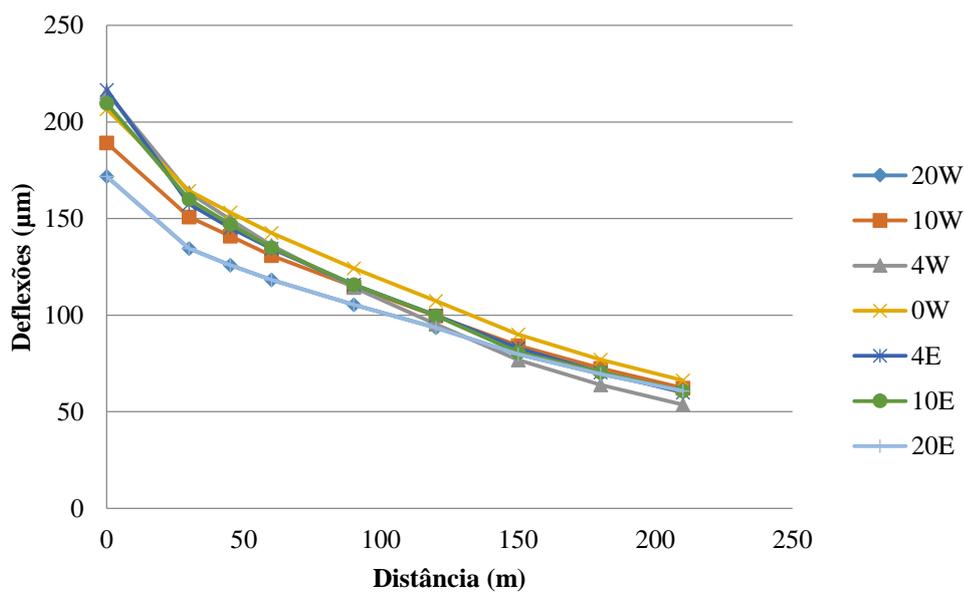


Figura 2.27 - Defletogramas médios da zona 4

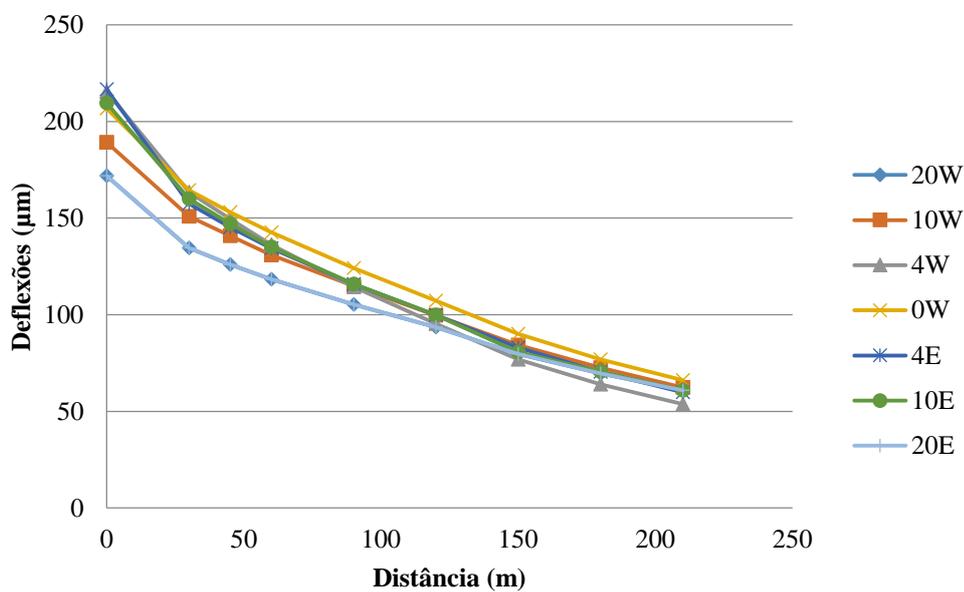


Figura 2.28 - Defletogramas médios da zona 5

Verifica-se que para as zonas que se considerou dos alinhamentos centrais ainda existia alguma variação das deflexões que resultava numa heterogeneidade dentro de cada zona, pelo que opta-se, por realizar uma subdivisão em zonas mais homogéneas.

Assim, reúne-se os alinhamentos laterais (20W, 10W, 10E e 20E), onde foram mantidas as zonas consideradas, tendo-se agrupado para os alinhamentos centrais (4W, 0W e 0E) onde se define as novas zonas (num total de 11), com as distâncias: 0 - 100 m; 125 - 400 m; 425 - 675 m; 700 - 975 m; 1000 - 1200 m; 1225 - 1375 m; 1400 - 1575m; 1625 - 1800 m; 1825 - 1975 m; 2000 - 2175 m e 2200 - 2450 m (Figura 2.29).

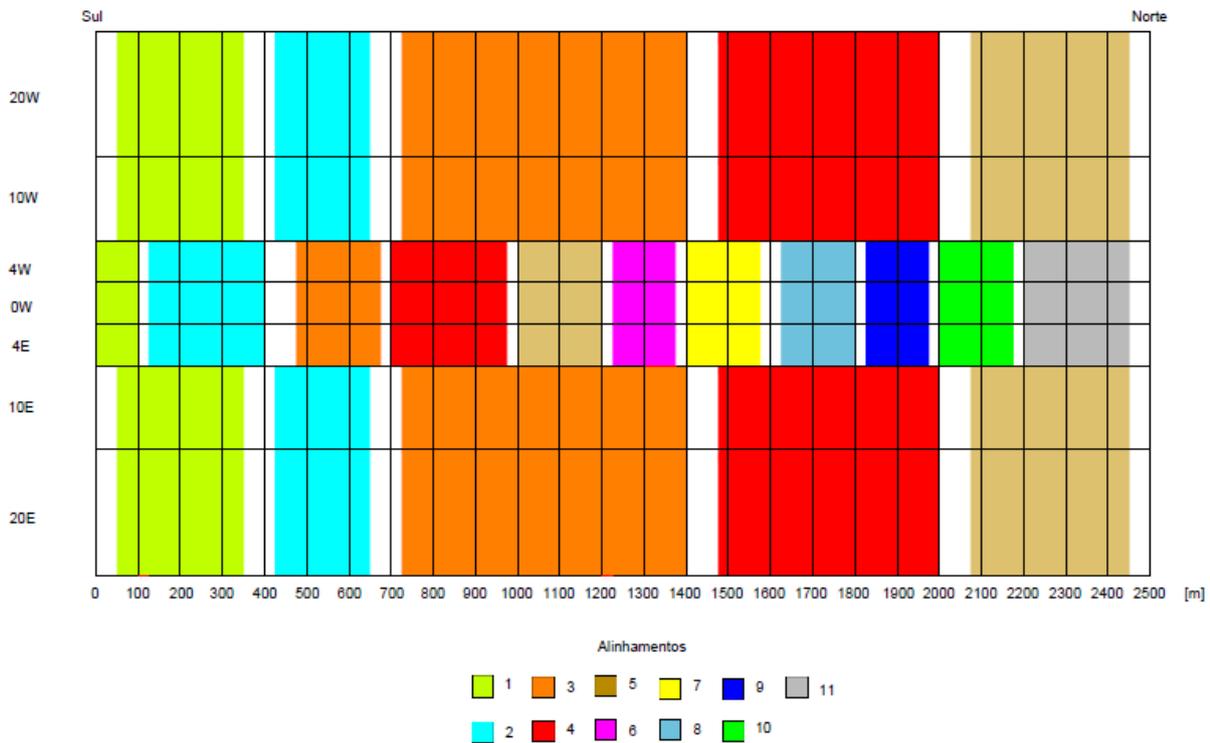


Figura 2.29 - Zonas estruturais homogéneas na pista

Seguidamente apresenta-se (Tabela 2.7 e Tabela 2.8) os valores máximos, mínimos, o desvio-padrão, a média e o percentil 85 para cada zona e alinhamento de cada conjunto de alinhamentos que se considera.

Tabela 2.7 - Zonamentos dos Alinhamentos Laterais

Zonas	Deflexões	D (1)	D (2)	D (3)	D (4)	D (5)	D (6)	D (7)	D (8)	D (9)
<b>Zona 1</b>	<b>Máximo</b>	250	201	186	174	151	132	110	95	82
	<b>Mínimo</b>	146	113	105	100	91	83	74	67	61
	<b>Media</b>	192	154	144	135	120	107	92	81	71
	<b>Desvio Padrão</b>	31	25	23	21	17	14	11	9	7
	<b>Percentil 85</b>	225	180	168	157	138	121	104	90	79
<b>Zona 2</b>	<b>Máximo</b>	436	342	316	284	234	195	177	157	141
	<b>Mínimo</b>	178	150	141	132	118	105	90	79	69
	<b>Media</b>	245	208	197	185	165	146	127	111	97
	<b>Desvio Padrão</b>	59	46	42	38	31	26	22	20	18
	<b>Percentil 85</b>	306	255	241	224	197	173	151	132	115
<b>Zona 3</b>	<b>Máximo</b>	317	238	227	212	189	165	143	129	116
	<b>Mínimo</b>	116	83	71	62	48	39	29	23	19
	<b>Media</b>	203	164	154	144	126	110	93	79	68
	<b>Desvio Padrão</b>	41	34	34	33	31	29	26	24	22
	<b>Percentil 85</b>	246	200	190	178	158	140	120	104	91
<b>Zona 4</b>	<b>Máximo</b>	458	400	372	339	284	241	203	175	153
	<b>Mínimo</b>	155	116	107	100	86	72	59	48	38
	<b>Media</b>	256	211	197	184	160	139	118	101	87
	<b>Desvio Padrão</b>	76	68	64	59	50	43	37	32	28
	<b>Percentil 85</b>	335	282	264	245	212	184	156	135	116
<b>Zona 5</b>	<b>Máximo</b>	289	232	211	191	157	130	104	90	79
	<b>Mínimo</b>	137	98	88	81	72	58	45	36	28
	<b>Media</b>	178	141	130	121	106	92	77	67	58
	<b>Desvio Padrão</b>	33	35	33	30	25	21	19	17	15
	<b>Percentil 85</b>	212	177	164	152	132	114	97	84	73

Tabela 2.8 - Zonamentos dos Alinhamentos Centrais

<b>Zonas</b>	<b>Deflexões</b>	<b>D (1)</b>	<b>D (2)</b>	<b>D (3)</b>	<b>D (4)</b>	<b>D (5)</b>	<b>D (6)</b>	<b>D (7)</b>	<b>D (8)</b>	<b>D (9)</b>
<b>Zona 1</b>	<b>Máximo</b>	255	166	156	145	127	110	93	81	71
	<b>Mínimo</b>	174	118	109	102	92	83	73	65	56
	<b>Media</b>	212	146	135	126	112	98	84	74	65
	<b>Desvio Padrão</b>	28	17	15	14	11	9	8	7	6
	<b>Percentil 85</b>	241	164	151	141	124	108	92	80	71
<b>Zona 2</b>	<b>Máximo</b>	357	277	257	233	191	155	126	109	94
	<b>Mínimo</b>	179	124	115	109	99	89	79	72	64
	<b>Media</b>	259	193	180	168	147	128	108	94	81
	<b>Desvio Padrão</b>	56	41	36	31	23	17	13	11	9
	<b>Percentil 85</b>	317	235	218	201	171	146	122	105	90
<b>Zona 3</b>	<b>Máximo</b>	524	382	342	302	265	232	197	166	138
	<b>Mínimo</b>	248	198	190	183	169	151	130	114	94
	<b>Media</b>	338	270	254	238	209	183	156	134	116
	<b>Desvio Padrão</b>	72	47	41	35	28	23	18	15	13
	<b>Percentil 85</b>	413	319	297	275	239	206	175	151	129
<b>Zona 4</b>	<b>Máximo</b>	307	260	246	230	202	175	150	133	122
	<b>Mínimo</b>	164	95	87	80	70	59	50	40	31
	<b>Media</b>	220	171	161	151	133	115	98	83	72
	<b>Desvio Padrão</b>	36	39	38	37	34	32	29	26	24
	<b>Percentil 85</b>	257	212	201	189	168	148	128	111	97
<b>Zona 5</b>	<b>Máximo</b>	384	343	330	314	279	244	207	175	147
	<b>Mínimo</b>	152	119	111	103	89	76	61	51	42
	<b>Media</b>	238	196	185	174	153	133	112	96	82
	<b>Desvio Padrão</b>	73	62	60	58	54	48	43	37	32
	<b>Percentil 85</b>	313	260	248	234	209	183	157	135	116
<b>Zona 6</b>	<b>Máximo</b>	601	477	428	374	296	236	185	151	129
	<b>Mínimo</b>	241	215	204	193	164	138	114	95	79
	<b>Media</b>	349	287	269	249	215	184	155	131	111
	<b>Desvio Padrão</b>	104	76	65	55	39	30	22	17	14
	<b>Percentil 85</b>	457	365	337	306	256	215	177	148	126
<b>Zona 7</b>	<b>Máximo</b>	516	406	371	345	300	268	237	209	185
	<b>Mínimo</b>	241	193	171	151	122	99	80	66	56
	<b>Media</b>	357	302	282	259	218	183	150	125	103
	<b>Desvio Padrão</b>	85	78	75	69	60	52	46	40	35
	<b>Percentil 85</b>	445	384	360	331	281	238	198	166	140
<b>Zona 8</b>	<b>Máximo</b>	765	601	529	459	387	321	263	216	181
	<b>Mínimo</b>	365	314	302	285	244	208	172	144	116
	<b>Media</b>	476	400	373	342	291	245	204	171	143
	<b>Desvio Padrão</b>	113	89	76	62	48	37	30	25	22
	<b>Percentil 85</b>	594	493	451	406	341	284	234	197	165

	<b>Deflexões</b>	<b>D (1)</b>	<b>D (2)</b>	<b>D (3)</b>	<b>D (4)</b>	<b>D (5)</b>	<b>D (6)</b>	<b>D (7)</b>	<b>D (8)</b>	<b>D (9)</b>
<b>Zona 9</b>	<b>Máximo</b>	459	373	331	286	230	184	145	119	99
	<b>Mínimo</b>	259	210	193	174	142	115	89	70	55
	<b>Media</b>	352	289	265	237	192	154	122	98	80
	<b>Desvio Padrão</b>	66	53	47	40	31	24	20	17	15
	<b>Percentil 85</b>	420	344	314	279	224	179	142	116	96
<b>Zona 10</b>	<b>Máximo</b>	330	283	270	254	224	197	170	147	126
	<b>Mínimo</b>	168	138	125	113	86	67	50	40	29
	<b>Media</b>	227	182	168	152	126	105	84	68	56
	<b>Desvio Padrão</b>	49	45	44	43	40	36	33	30	27
	<b>Percentil 85</b>	278	229	214	197	168	142	118	100	84
<b>Zona 11</b>	<b>Máximo</b>	288	227	209	188	156	130	109	98	87
	<b>Mínimo</b>	150	98	88	84	76	68	59	52	46
	<b>Media</b>	209	155	143	134	117	102	86	74	64
	<b>Desvio Padrão</b>	38	34	32	28	22	18	15	13	12
	<b>Percentil 85</b>	248	191	177	163	140	121	101	88	76

### Resultados do radar de prospeção

Os ensaios com radar de prospeção realizam-se ao longo dos mesmos alinhamentos onde se realizam os ensaios com o defletómetro de impacto, utilizando antenas de 1,0 GHz e 1,8 GHz.

Os ficheiros obtidos nos ensaios com o radar de prospeção necessitam de ser analisados por sub-trechos, já que o pavimento em estudo apresentava uma constituição e geometria heterogénea.

Após a análise do ficheiro de dados, define-se a espessura da camada betuminosa para cada um dos pontos representativos (Tabela 2.9).

Tabela 2.9 - Espessura betuminosa

Ponto Escolhido			Deflexões									Espessura da camada betuminosa (cm)	
Alinhamento	Distância	Tipo	D (1)	D (2)	D (3)	D (4)	D (5)	D (6)	D (7)	D (8)	D (9)		
Centrais	4W	25	P85	226	166	156	145	127	110	93	80	71	65
	4W	175	P88	304	236	220	205	176	151	125	106	90	56
	4E	525	P85	390	313	294	273	239	208	175	150	128	52
	4W	925	P85	256	222	209	197	174	151	128	110	93	53
	4E	1125	P85	335	269	257	244	221	197	172	150	130	58
	0W	1350	P85	413	351	330	305	259	218	178	146	118	50
	4W	1475	P85	455	388	361	326	266	215	172	136	110	54
	4W	1675	P85	516	428	399	365	314	268	226	193	165	54
	4E	1875	P85	410	342	314	282	226	178	137	107	83	47
	0W	2100	P85	287	248	232	212	179	148	120	99	82	48
	4W	2325	P85	252	189	177	163	138	116	95	79	68	66
Laterais	10E	50	P85	223	167	154	146	132	119	103	91	81	64
	20E	575	P85	259	226	216	204	183	163	142	123	106	54
	20W	1100	P85	249	203	192	179	158	139	117	101	87	58
	10W	1775	P85	332	285	268	247	213	183	155	133	113	55
	10W	2375	P85	193	150	142	135	124	112	99	88	78	71

### Modelos de resposta estrutural

A partir dos resultados dos ensaios de carga e com o apoio dos resultados determinados pelo radar de prospecção, estabelecem-se modelos de comportamento estrutural para cada zona definida do trecho em estudo. O principal objetivo consiste em determinar os módulos de deformabilidade das camadas tendo em conta as deformadas obtidas nos ensaios com o defletómetro de impacto.

Conhecidas as espessura e constituição das camadas, utiliza-se um modelo estrutural para o pavimento. Faz-se várias iterações e determina-se qual o conjunto de módulos de deformabilidade das camadas que conduz a uma deformada calculada tão próxima quanto possível da deformada medida *in situ* no ensaio representativo dessa zona, ou seja, o local de ensaio correspondente ao percentil 85.

A determinação dos módulos de deformabilidade das camadas do pavimento efetua-se através do programa de cálculo automático JPavBack.

O programa tem como modelo base o modelo de *Burmister*, que considera que o pavimento é composto por um conjunto de camadas horizontais, contínuas, homogêneas, isotrópicas e elásticas-lineares, assentes sobre um meio semi-infinito, e que na superfície do conjunto de camadas atua uma carga vertical uniformemente distribuída numa área circular.

Para usar o programa de cálculo automático JPavBack necessita-se definir dados referentes a três características: a carga aplicada na superfície do pavimento, as camadas do pavimento e a posição onde se pretende determinar a deflexão devida à carga.

A carga aplicada e a posição de determinação das deflexões mantêm-se inalteráveis para todas as zonas do trecho em estudo. A carga vertical aplicada corresponde à força padrão de 150 kN, utilizada nos ensaios com o defletómetro de impacto, com um raio de distribuição da carga de 0,225 m (Figura 2.30).

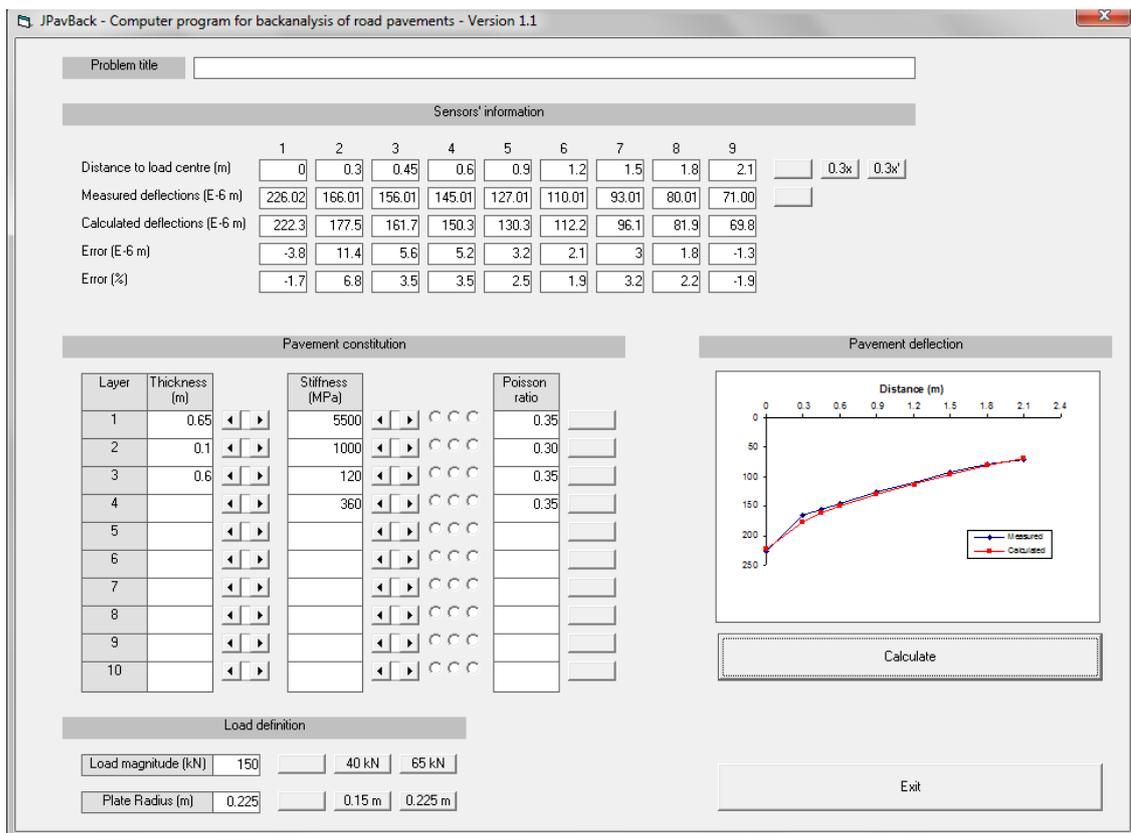


Figura 2.30 - Dados de entrada no programa JPavBack

Os pontos onde se pretende determinar a deflexão devido à aplicação da carga circular de 150 kN correspondem à posição dos sensores do ensaio de carga, distribuídos linearmente pela superfície do pavimento.

Para a definição do modelo de comportamento estrutural, adota-se coeficientes de Poisson de 0,35 para as misturas betuminosas, fundação e camada semi-infinita. Na camada de base adota-se um coeficiente de Poisson de 0,30.

Importa referir que, com o objetivo de aproximar a modelação o mais possível da realidade, divide-se a fundação numa camada superior e numa camada inferior de espessura semi-infinita com características de camada rígida, ou seja com um módulo de deformabilidade significativamente superior à primeira.

Na análise em estudo considera-se as seguintes quatro camadas: uma camada de misturas betuminosas; uma camada de betão pobre; e duas camadas para a fundação.

Após várias iterações define-se os módulos de deformabilidade para cada ponto representativo de cada zona dos alinhamentos centrais e alinhamentos laterais que minimizam o erro entre a deformada do defletómetro de impacto e a deformada calculada.

Para este erro (RMS (*Root Mean Square*)), adota-se o limite máximo de 10%, sendo dado pela raiz quadrada dos valores médios dos quadrados das diferenças entre as deflexões medidas e calculadas divididas pelos valores médios (Domingos, 2007).

$$RMS(\%) = \left( \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \left( \frac{d_{ci} - d_{mi}}{d_{mi}} \right)^2} \right) \times 100 \quad (2.11)$$

Onde:

n: Número total de sismómetros utilizados;

$d_{ci}$ : Deflexão calculada no sismómetro i;

$d_{mi}$ : Deflexão medida no sismómetro i.

A título de exemplo, apresenta-se os cálculos para o alinhamento central 4W a 175 m (Figura 2.31).

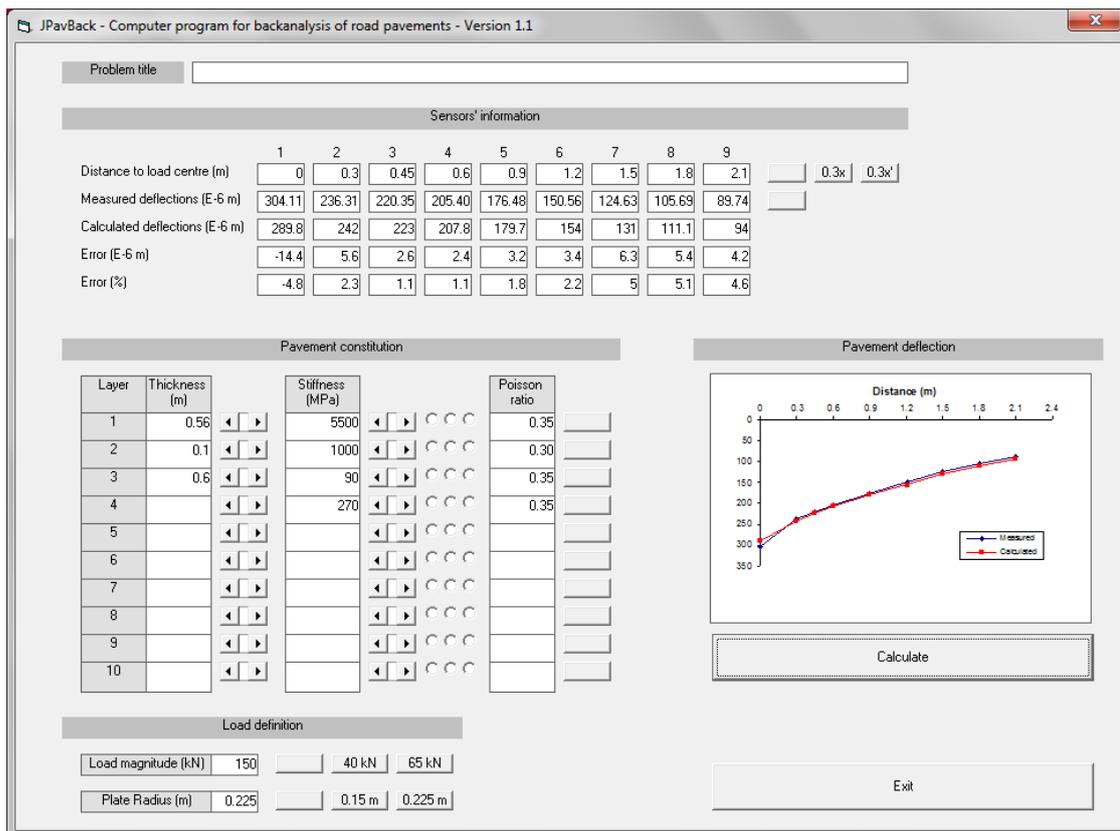


Figura 2.31 - Modelação do alinhamento central 4W recorrendo ao programa JPavBack

Encontra-se na Tabela 2.10 os modelos estruturais de todas as zonas indicando o módulo de deformabilidade (E), o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), a espessura da camada (h) e a temperatura ambiente (T).

Tabela 2.10 - Modelos estruturais

Zona	Mistura betuminosa				Betão Pobre			Solo de Fundação			
	E (MPa)	$\nu$	h (m)	T (°C)	E (MPa)	$\nu$	h (m)	E (MPa)	$\nu$	h (m)	
Alinhamento Central	1	5500	0,35	0,65	14,50	1000	0,30	0,10	120	0,35	0,60
	2	5500	0,35	0,56	14,90	1000	0,30	0,10	90	0,35	0,60
	3	4000	0,35	0,52	14,90	1000	0,30	0,10	70	0,35	0,60
	4	6700	0,35	0,53	13,50	1000	0,30	0,10	90	0,35	0,60
	5	5000	0,35	0,58	14,60	1000	0,30	0,10	65	0,35	0,60
	6	4000	0,35	0,50	14,80	1000	0,30	0,10	70	0,35	0,60
	7	2500	0,35	0,54	13,70	1000	0,30	0,10	70	0,35	0,60
	8	3000	0,35	0,54	13,80	1000	0,30	0,10	50	0,35	0,60
	9	3000	0,35	0,47	14,60	1000	0,30	0,10	90	0,35	0,60
	10	6000	0,35	0,48	15,20	1000	0,30	0,10	100	0,35	0,60
	11	4800	0,35	0,66	14,10	1000	0,30	0,10	80	0,35	0,60
Alinhamento Lateral	1	7500	0,35	0,64	15,30	1000	0,30	0,10	100	0,35	0,60
	2	9000	0,35	0,54	12,50	1000	0,30	0,10	60	0,35	0,60
	3	9000	0,35	0,58	13,60	1000	0,30	0,10	90	0,35	0,60
	4	5500	0,35	0,55	12,40	1000	0,30	0,10	80	0,35	0,60
	5	8000	0,35	0,71	12,10	1000	0,30	0,10	100	0,35	0,60

Os módulos de deformabilidade apresentados na Tabela 2.10 referem-se às condições em que se realiza os ensaios de carga com defletómetro de impacto, que não são necessariamente as condições representativas do comportamento estrutural dos pavimentos ao longo do ano. Com efeito, os módulos de deformabilidade das misturas betuminosas variam consideravelmente com a temperatura a que estas camadas se encontram. Assim, procede-se à correção dos módulos estimados para as camadas betuminosas tendo em conta a temperatura de cálculo destas camadas, determinada de acordo com a metodologia preconizada pela SHELL (SHELL, 1978).

Tal como já referido, para a determinação da temperatura de cálculo utilizam-se os valores das temperaturas médias mensais do ar na região em estudo.

A correção dos módulos de deformabilidade das camadas betuminosas para a temperatura de cálculo efetua-se através da expressão (2.12) (Antunes, 1993):

$$E_t^{MB} = (1,635 - 0,0317 \times t_{med}) \times E_{20^\circ C}^{MB} \quad (2.12)$$

Onde:

$E_t^{MB}$ : Módulo de deformabilidade das misturas betuminosas (MPa);

$t_{med}$ : Temperatura média das misturas betuminosas (°C);

$E_{20°C}^{MB}$ : Módulo de deformabilidade das misturas betuminosas para a temperatura de referência de 20°C (MPa).

Sabe-se que os ensaios de carga realizaram-se em período noturno, então, admite-se que não existem gradientes térmicos consideráveis no interior das camadas betuminosas, e que a temperatura média das camadas é igual à temperatura medida à superfície.

Com estas considerações, calcula-se e os módulos de deformabilidade corrigidos para as temperaturas de cálculo. Estes resultados encontram-se na Tabela 2.11.

Tabela 2.11 - Módulos de deformabilidade da camada betuminosa para a temperatura de cálculo

Alinhamento	Distância (m)	Zona	T <sub>ensaio</sub> (°C)	Mistura betuminosa			
				E <sub>ensaio</sub> (MPa)	T <sub>cálculo</sub> (°C)	E <sub>20°C</sub> (MPa)	
Alinhamento Central	4W	25	AC 1	14,50	5500	20	4700
	4W	175	AC 2	14,90	5500	20	4750
	4E	525	AC 3	14,90	4000	20	3450
	4W	925	AC 4	13,50	6700	20	5600
	4E	1125	AC 5	14,60	5000	20	4300
	0W	1350	AC 6	14,80	4000	20	3450
	4W	1475	AC 7	13,70	2500	20	2100
	4W	1675	AC 8	13,80	3000	20	2550
	4E	1875	AC 9	14,60	3000	20	2600
	0W	2100	AC 10	15,20	6000	20	5250
	4W	2325	AC 11	14,10	4800	20	4050
Alinhamento Lateral	10E	50	AL 1	15,30	7500	20	6600
	20E	575	AL 2	12,50	9000	20	7300
	20W	1100	AL 3	13,60	9000	20	7500
	10W	1775	AL 4	12,40	5500	20	4500
	10W	2375	AL 5	12,10	8000	20	6400

## Carga máxima admissível

Para determinar o valor da carga máxima admissível avaliam-se os valores das extensões verificadas no pavimento com o programa ELSYPAV tendo em conta os critérios de dimensionamento aplicáveis aos pavimentos em estudo.

Os estados limite de ruína geralmente considerados no dimensionamento de pavimentos flexíveis são:

- Fendilhamento por fadiga das camadas betuminosas;
- Deformações permanentes excessivas devidas à fundação do pavimento.

Para o presente caso de estudo adota-se os critérios de dimensionamento às deformações permanentes desenvolvidos por Chou (Chou, 1982) através da observação de pavimentos aeroportuários, visando a limitação da contribuição do solo de fundação para a formação de deformações permanentes excessivas de acordo com (2.13):

$$\epsilon_v = 0,00539 \times N^{-0,1436} \quad (2.13)$$

Onde,

$\epsilon_v$ : Extensão vertical máxima de compressão no topo do solo de fundação;

N: Número máximo admissível movimentos.

A limitação do fendilhamento por fadiga das camadas betuminosas avalia-se de acordo com o critério de dimensionamento apresentado pela Shell (2.14):

$$\epsilon_t = (0,856 \times V_b + 1,08) \times E_m^{-0,36} \times N^{-0,2} \quad (2.14)$$

Onde,

$\epsilon_t$ : Extensão horizontal máxima de tração na base da camada betuminosa;

N: Número máximo admissível de passagens de eixos;

$V_b$ : Percentagem volumétrica de betume na mistura betuminosa (%);

$E_m$ : Módulo de deformabilidade da mistura betuminosa (Pa).

Na Tabela 2.12 apresenta-se os valores máximos de extensão horizontal de tração ( $\epsilon_t$ ) e de extensão vertical de compressão máxima ( $\epsilon_z$ ) correspondentes aos valores limite de PCN de cada zona.

De notar que os valores da Tabela 2.12, foram limitados a um PCN de 150, sendo que em algumas zonas este valor poderia ser maior.

Tabela 2.12 - Valores máximo das extensões de tração e de compressão

Alinhamentos	Zona	PCN	Extensões $\epsilon_t$	Limite $\epsilon_t$	Extensões $\epsilon_z$	Limite $\epsilon_z$
<b>Central</b>	<b>1</b>	150	186	504	824	1436
	<b>2</b>	150	240	502	1150	1436
	<b>3</b>	120	288	563	1390	1436
	<b>4</b>	150	232	473	1140	1436
	<b>5</b>	150	262	520	1310	1436
	<b>6</b>	115	294	563	1420	1436
	<b>7</b>	90	294	673	1420	1436
	<b>8</b>	90	282	628	1370	1436
	<b>9</b>	100	311	623	1430	1436
	<b>10</b>	150	266	484	1290	1436
	<b>11</b>	150	211	531	1080	1436
<b>Lateral</b>	<b>1</b>	150	158	446	751	1436
	<b>2</b>	150	202	430	1160	1436
	<b>3</b>	150	170	426	846	1436
	<b>4</b>	150	263	512	1260	1436
	<b>5</b>	150	139	451	650	1436

### Classe de resistência da fundação

A classificação da fundação dos pavimentos realiza-se de acordo com o estabelecido pela ICAO para efeitos de classificação ACN-PCN, conforme indica-se na Tabela 2.13.

Tabela 2.13 - Classes de resistência da fundação

Classes da fundação		Pavimentos flexíveis	Pavimentos rígidos
<b>A</b>	<b>Elevada</b>	$CBR \geq 13$	$k \geq 120$
<b>B</b>	<b>Média</b>	$8 < CBR < 13$	$60 < k < 120$
<b>C</b>	<b>Baixa</b>	$4 < CBR \leq 8$	$25 < k \leq 60$
<b>D</b>	<b>Muito Baixa</b>	$CBR \leq 4$	$k \leq 25$

Para os pavimentos flexíveis, a classificação da resistência da fundação realiza-se com base nos resultados obtidos para os módulos de deformabilidade do solo de fundação por retro-análise, adota-se a expressão preconizada pela Shell (SHELL, 1978), para estimar o CBR da fundação em função do módulo de deformabilidade dos solos, E (2.15):

$$E \text{ (MPa)} \cong 10 \times CBR \quad (2.15)$$

Na Tabela 2.14 expõe-se as categorias da fundação dos pavimentos flexíveis, tendo em atenção os módulos de deformabilidade obtidos na retro-análise.

Tabela 2.14 - Categoria da fundação de cada alinhamento

Zonas		Solo de Fundação, E (MPa)	CBR Estimado	Classificação
<b>Alinhamento Central</b>	<b>1</b>	120	12	B
	<b>2</b>	90	9	B
	<b>3</b>	70	7	C
	<b>4</b>	90	9	B
	<b>5</b>	65	6.5	C
	<b>6</b>	70	7	C
	<b>7</b>	70	7	C
	<b>8</b>	50	5	C
	<b>9</b>	90	9	B
	<b>10</b>	100	10	B
	<b>11</b>	80	8	C
<b>Alinhamento Lateral</b>	<b>1</b>	100	10	B
	<b>2</b>	60	6	C
	<b>3</b>	90	9	B
	<b>4</b>	80	8	C
	<b>5</b>	100	10	B

## PCN dos pavimentos

Os valores de PCN determinados para cada uma das zonas dos pavimentos em estudo a partir dos resultados obtidos para a carga máxima admissível correspondente a 10000 recobrimentos, encontram-se na Tabela 2.15.

Tabela 2.15 - PCN dos pavimentos

Zonas	Valor Numérico do PCN	Pavimento		Categoria da Fundação		Pressão dos Pneus		Modo de avaliação		PCN	
		Tipo	Designação	Estimativo do CBR	Designação	Nome	Designação	Nome	Designação		
Alinhamentos Centrais	1	150	Flexível	F	12	B	Ilimitado	W	Técnica	T	150/F/B/W/T
	2	150	Flexível	F	9	B	Ilimitado	W	Técnica	T	150/F/B/W/T
	3	120	Flexível	F	7	C	Ilimitado	W	Técnica	T	120/F/C/W/T
	4	150	Flexível	F	9	B	Ilimitado	W	Técnica	T	150/F/B/W/T
	5	150	Flexível	F	6,5	C	Ilimitado	W	Técnica	T	150/F/C/W/T
	6	115	Flexível	F	7	C	Ilimitado	W	Técnica	T	115/F/C/W/T
	7	90	Flexível	F	7	C	Ilimitado	W	Técnica	T	90/F/C/W/T
	8	90	Flexível	F	5	C	Ilimitado	W	Técnica	T	90/F/C/W/T
	9	100	Flexível	F	9	B	Ilimitado	W	Técnica	T	100/F/B/W/T
	10	150	Flexível	F	10	B	Ilimitado	W	Técnica	T	150/F/B/W/T
	11	150	Flexível	F	8	C	Ilimitado	W	Técnica	T	150/F/B/W/T
Alinhamentos Laterais	1	150	Flexível	F	10	B	Ilimitado	W	Técnica	T	150/F/B/W/T
	2	150	Flexível	F	6	C	Ilimitado	W	Técnica	T	150/F/C/W/T
	3	150	Flexível	F	9	B	Ilimitado	W	Técnica	T	150/F/B/W/T
	4	150	Flexível	F	8	C	Ilimitado	W	Técnica	T	150/F/C/W/T
	5	150	Flexível	F	10	B	Ilimitado	W	Técnica	T	150/F/B/W/T

## **2.6. Conclusão**

Com a realização deste capítulo pode observar-se que são necessários inúmeros passos antes da determinação do valor do PCN. Este pode realizar-se através de dois métodos distintos, sendo que ambos tem características próprias.

Relativamente à determinação do PCN através do programa de cálculo COMFAA, têm de se ter em especial atenção ao cálculo da espessura equivalente, pois têm de se ajustar os fatores de equivalência denominados pela FAA 5010.

Outro aspeto importante a ter em conta neste método é a criação de aviões no programa COMFAA. Esta criação apresenta pesquisa e cálculos, nomeadamente do peso bruto do avião, o número de engrenagens principais, saídas anuais, CBR, entre outros, pois alguns não se encontram na base de dados.

Comparativamente à determinação do PCN através do método empírico-mecanicista, têm de se ter em especial atenção ao cálculo do módulo de deformabilidade das camadas que deve apresentar um erro inferior a 10%.

Este método tem em conta as deflexões normalizadas, o módulo de deformabilidade da camada betuminosa ajustada à temperatura anual da região em estudo, a determinação do CBR e a caracterização do PCN de acordo com o valor numérico, tipo de pavimento, a designação do CBR, da pressão dos pneus e do modelo de avaliação.

### **3. APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE CÁLCULO DO PCN**

Nesta fase da dissertação aplicam-se os métodos de avaliação do ACN-PCN que se apresentaram no capítulo anterior ao caso do Aeródromo de Bragança.

Para este caso de estudo analisam-se os resultados obtidos dos ensaios realizados na pista (ensaios com defletómetro de impacto e medição da temperatura), sendo que para a constituição do pavimento foram utilizados dados fornecidos pelo aeródromo.

A seguir é feita uma apresentação geral do aeródromo quanto à sua evolução, localização geográfica, tráfego e clima da região, seguindo-se a apresentação dos resultados da realização do estudo, e cálculo do PCN.

#### **3.1. Aeródromo de Bragança**

Tal como referido anteriormente, o Aeródromo de Bragança (Figura 3.1) foi o aeródromo escolhido para o estudo de caso desta dissertação.



Figura 3.1 - Vista do Aeródromo de Bragança

O aeródromo situa-se em Bragança, a uma distância de 10 km a Nordeste da capital de distrito, tal como indicado na Figura 3.2.

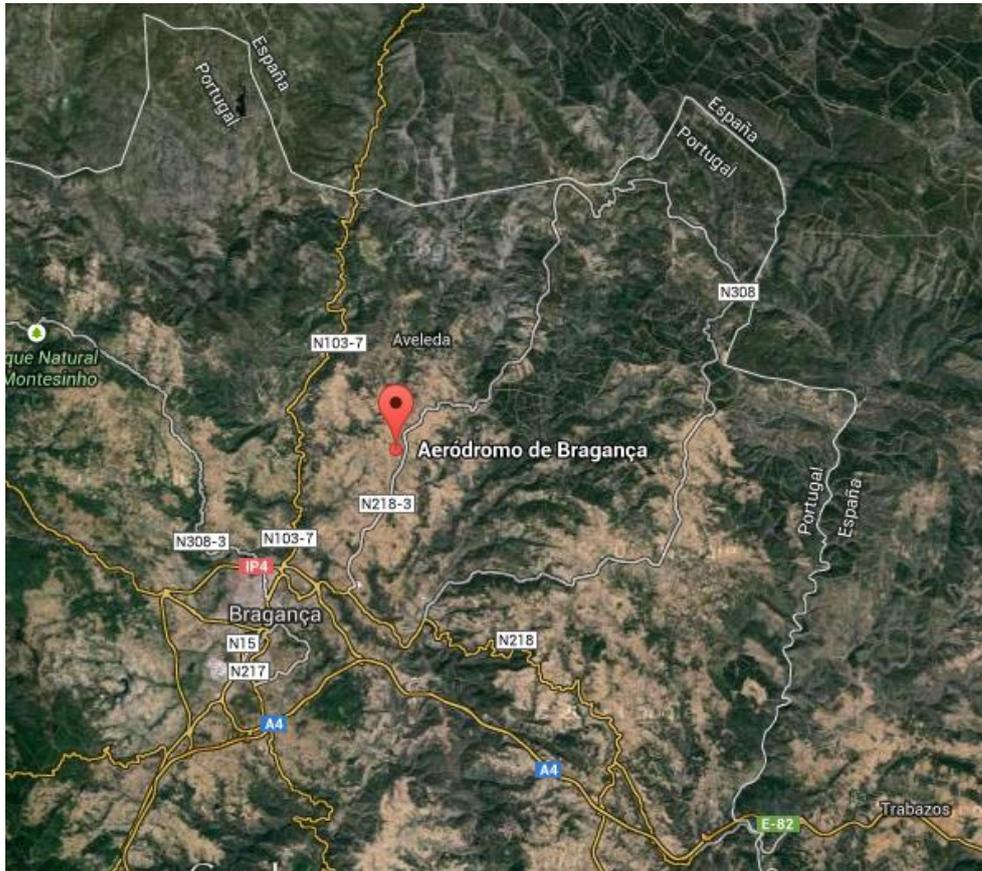


Figura 3.2 - Localização do aeródromo de Bragança

Segundo o Plano Diretor Municipal (PDM) de Bragança, este foi construído entre os anos de 1965 e 1972 pela Câmara Municipal de Bragança.

Entre 1972 e 1975, a Direção Geral de Aeronáutica Civil (DGAC) prosseguiu para a construção de uma primeira fase no campo de voos. Ao fim desta fase, o aeródromo já era constituído por:

- Uma pista de 1200 m de comprimento;
- Uma plataforma de  $80 \times 60$  m;
- Um caminho de circulação.

Com o passar dos anos e para uma melhoria da infraestrutura, realizaram-se várias ações com o intuito de ampliar e aperfeiçoar os serviços prestados e a sua capacidade.

Em 1976 foi aprovado o primeiro Plano Diretor do Aeroporto de Bragança.

Posteriormente, em 1989, foi instalada a iluminação noturna que permitia operar de noite, embora esta instalação só tenha sido certificada pela Força Aérea Portuguesa em Janeiro de 2003. Para utilizar o Aeroporto fora do seu período de abertura (desde o pôr-do-sol até ao amanhecer) é necessária uma autorização especial pois, devido à pouca frequência de utilização neste período, não existe um controlador na torre de forma permanente.

Mais tarde, entre 1997 e 1998, o pavimento da pista foi reforçado com uma camada de 5 cm de betão betuminoso.

Em 2000 a GIBB Portugal desenvolveu o documento “Revisão do Plano Diretor de Desenvolvimento”, no qual se incluía o “Projeto de Ampliação da Pista”.

Em 2005, a pista foi ampliada no seu comprimento em 500 m para Sul, ficando assim uma pista com um comprimento total de 1700 m. Neste mesmo ano, também se construíram bermas laterais pavimentadas de 7,5 m em todo o seu comprimento.

Atualmente a pista, toda ela pavimentada, tem um comprimento total de 1700 m, 30 m de largura (15 m para cada lado do eixo) com bermas resistentes de 7,5 m em todo o seu comprimento, adequada para aviões até ao tipo B. O caminho de circulação que liga a pista de voo à única plataforma de estacionamento, tem uma largura de 15 m, tendo esta última capacidade para estacionar quatro aviões do tipo B.

Segundo o PDM de Bragança, a capacidade do atual terminal é de 18 passageiros em hora de ponta, com um nível de serviço D, segundo a classificação da IATA (Associação Internacional de Transportes Aéreos), que equivale a um nível de qualidade adequado.

O tráfego do aeródromo é constituído pela frota de aviões apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Tráfego do aeródromo (Enc24)

<b>Modelo</b>	<b>% Saídas anuais</b>	<b>Peso (lbs)</b>	<b>Velocidade (kts)</b>
<b>Dornier 228</b>	30,8	12566	231
<b>ATR 42-300</b>	7,7	36817	265
<b>Piper Seneca</b>	15,4	4751	204
<b>Cessna 172</b>	15,4	2454	163
<b>Morane Saulnier 893</b>	30,8	1698	135

A pista inicialmente existente era formada por um pavimento flexível constituído por duas camadas sobre a fundação, a camada de base e a camada betuminosa. A camada de base é

constituída por material agregado, com 300 milímetros de espessura e a camada betuminosa tinha 50 mm de espessura. A ampliação da pista foi realizada desde os 1200 m até aos 1700 m, e a espessura da camada betuminosa (superficial) foi aumentada com 50 mm obtendo-se um total de 100 mm, como pode ser visto na secção transversal do pavimento existente na Figura 3.3 (Lalyre, 2012).

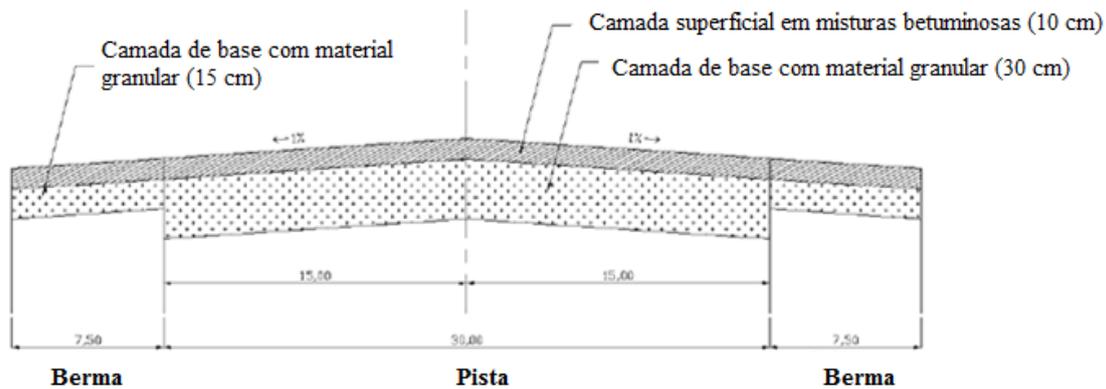


Figura 3.3 - Secção do pavimento da pista existente (Lalyre, 2012)

Para modelação do comportamento do pavimento define-se os coeficientes de Poisson seguintes: 0,30 para a camada de misturas betuminosas, 0,35 para a camada granular e camada de fundação.

### 3.2. Método empírico-mecanicista

Tendo em vista a caracterização estrutural do pavimento da pista de voo do Aeródromo de Bragança, através do método empírico-mecanicista, realizam-se trabalhos experimentais que compreenderam ensaios de carga com defletómetro de impacto e a medição de temperatura. A análise dos resultados obtidos resulta em modelos de resposta para o pavimento, em particular na determinação da sua capacidade de carga, que permite a classificação PCN do pavimento.

### 3.2.1. Ensaio de carga com defletómetro de impacto

Como referido anteriormente, executam-se os ensaios de carga com defletómetro de impacto na pista. Estes ensaios realizam-se no dia 17 de junho de 2014, em período diurno, perante condições climatéricas que permitiram que a camada betuminosa do pavimento tivesse um comportamento elástico linear.

Para cada ponto de ensaio aplicaram-se 3 níveis de carga com vista à sua normalização para a carga de 65 kN, induzida sobre uma placa de carga com diâmetro de 0,15 m. Para cada ensaio mede-se nove deflexões decorrentes da força de impacto, em pontos situados a 0 m; 0,30 m; 0,45 m; 0,60 m; 0,90 m; 1,20 m; 1,50 m; 1,80 m e 2,10 m do centro da placa (que correspondem respetivamente às deflexões designadas por D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>, D<sub>3</sub>, D<sub>4</sub>, D<sub>5</sub>, D<sub>6</sub>, D<sub>7</sub>, D<sub>8</sub> e D<sub>9</sub>).

Os ensaios efetuam-se com o defletómetro de impacto ao longo de um alinhamento longitudinal paralelo à respetiva linha central (Figura 3.4), feito de Norte para Sul.

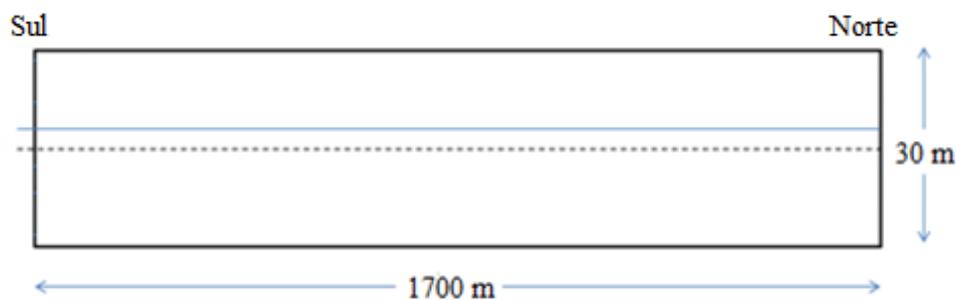


Figura 3.4 - Alinhamento de ensaio com o defletómetro de impacto

Durante os ensaios de carga mede-se as temperaturas do ar ( $T_{Ar}$ ) e da superfície do pavimento ( $T_{Sup}$ ). Elaboram-se ainda medições da temperatura no pavimento às profundidades de 2,5 cm, 9,5 cm e 10,0 cm.

De seguida (Figura 3.5) encontram-se os resultados dos ensaios de carga normalizados para uma força de impacto de 65 kN.

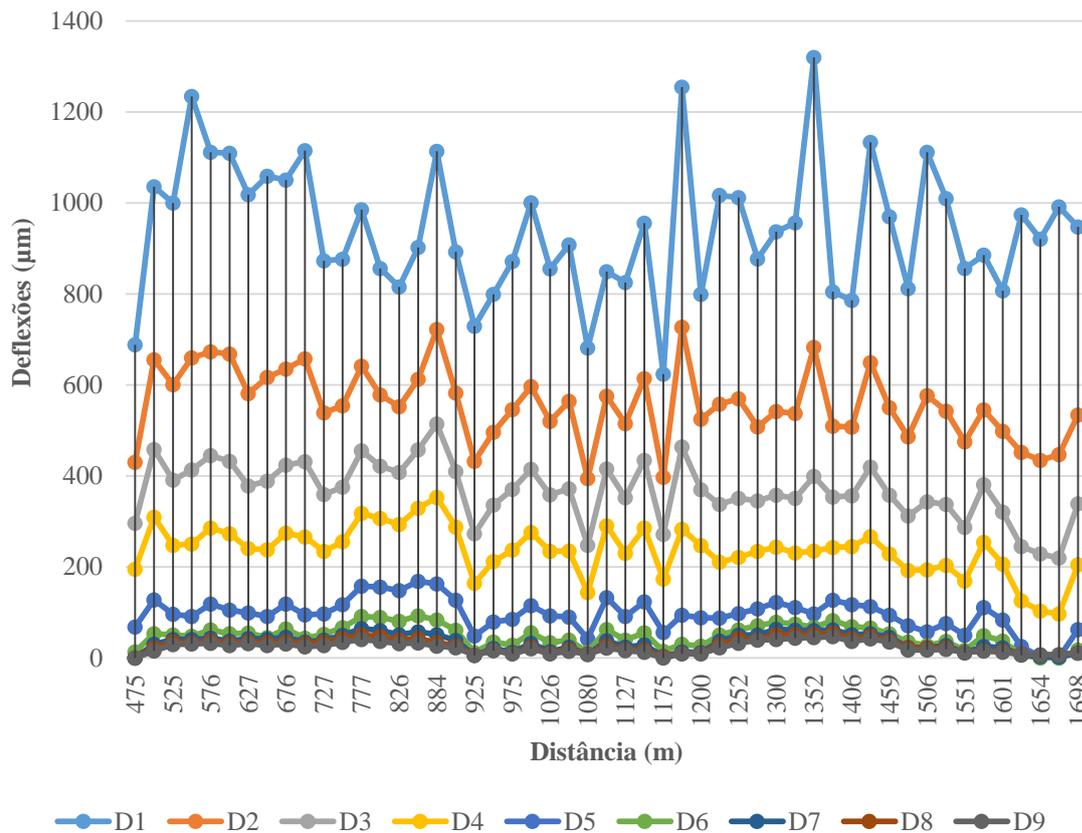


Figura 3.5 - Deflexões normalizadas no pavimento nos ensaios de carga

### 3.2.2. Zonamento do pavimento

Os gráficos de evolução das deflexões normalizadas para uma força de 65 kN possibilitam a definição de zonas de comportamentos estruturais distintos (Figura 3.6). Para cada uma das zonas consideradas determina-se os valores das médias, desvios padrão e percentil 85 obtidos para as deflexões normalizadas.

Através do método das diferenças acumuladas considera-se uma subdivisão do pavimento em cinco zonas homogêneas, como se verifica na Figura 3.7. Na Tabela 3.2 apresenta-se um resumo das zonas homogêneas do pavimento.

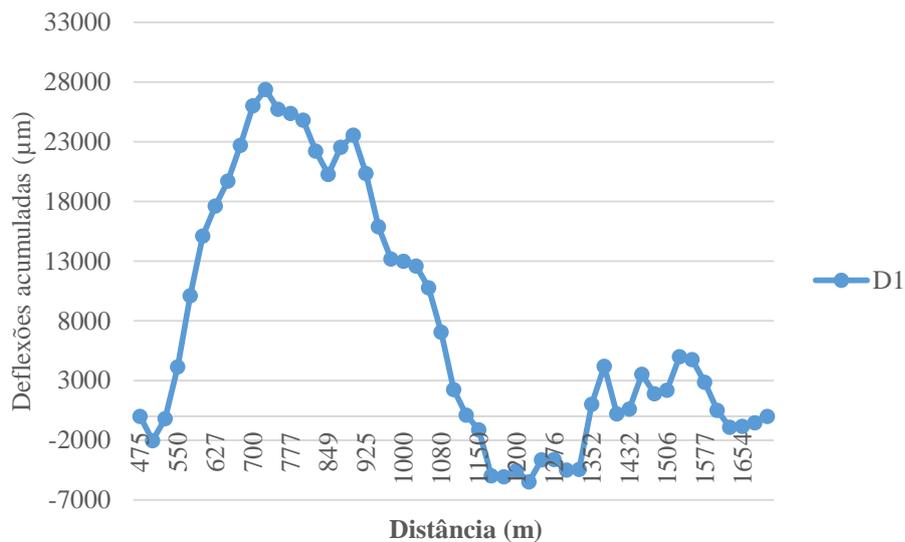


Figura 3.6 - Gráfico das diferenças acumuladas D (1)

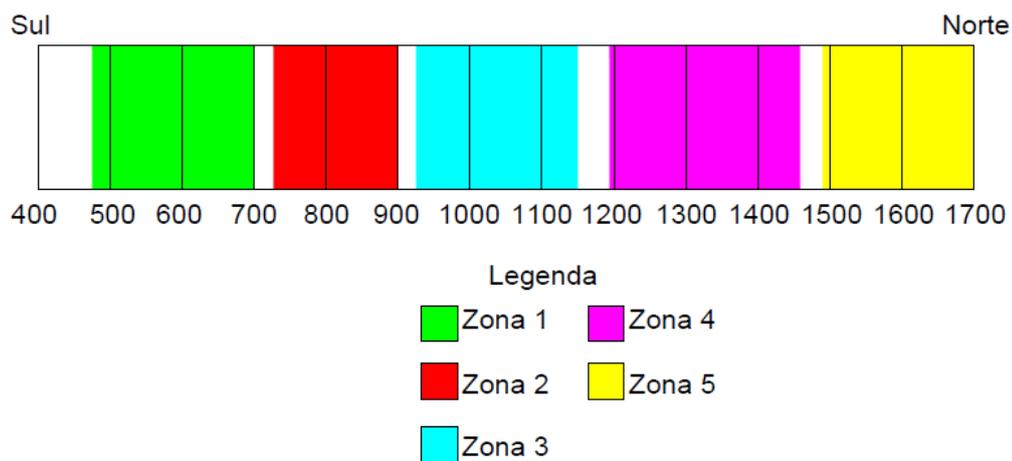


Figura 3.7 - Zonas estruturais homogêneas na pista

Tabela 3.2 - Caracterização das deflexões das zonas homogêneas

Deflexão	D (1)	D (2)	D (3)	D (4)	D (5)	D (6)	D (7)	D (8)	D (9)
<b>Zona</b>	<b>1</b>								
<b>Média</b>	1081	639	418	265	105	53	40	33	28
<b>Desvio-padrão</b>	71	32	27	23	14	7	5	5	5
<b>Percentil 85</b>	1155	672	447	290	119	60	45	38	33
<b>Zona</b>	<b>2</b>								
<b>Média</b>	914	598	425	297	142	77	52	40	32
<b>Desvio-padrão</b>	94	61	50	39	25	15	9	8	6
<b>Percentil 85</b>	1012	661	477	337	168	93	61	48	38
<b>Zona</b>	<b>3</b>								
<b>Média</b>	848	525	358	231	90	38	21	16	14
<b>Desvio-padrão</b>	97	70	60	48	29	17	11	7	5
<b>Percentil 85</b>	948	598	420	281	121	55	32	23	19
<b>Zona</b>	<b>4</b>								
<b>Média</b>	989	572	372	241	105	61	47	39	34
<b>Desvio-padrão</b>	173	73	37	19	13	18	18	15	13
<b>Percentil 86</b>	1169	649	411	261	119	80	65	55	47
<b>Zona</b>	<b>5</b>								
<b>Média</b>	931	499	302	175	54	23	16	15	13
<b>Desvio-padrão</b>	95	48	54	51	36	17	10	6	5
<b>Percentil 87</b>	1031	549	358	228	91	41	26	21	18

### 3.2.3. Caracterização estrutural do pavimento

Tendo por base os resultados obtidos nos pontos representativos de cada zona do ensaio de carga com defletómetro de impacto e do conhecimento da constituição e espessura das camadas do pavimento, obtém-se os módulos de deformabilidade das camadas constituintes do pavimento, com recurso ao programa de cálculo automático JPavBack. Para tal, utiliza-se um processo iterativo tendo em vista a determinação do conjunto de módulos de deformabilidade das camadas que conduz a uma deformada calculada com o programa JPavBack tão próxima quanto possível do conjunto de deflexões medidas no ensaio (retro-análise).

De forma a determinar os módulos de deformabilidade para cada zona teve-se atenção, se o erro entre a deformada do defletómetro de impacto e a deformada calculada era inferior a 10%.

De seguida apresenta-se a modelação realizada com o programa onde se verifica o bom ajuste entre as deflexões medidas e calculadas (Figura 3.8, Figura 3.9, Figura 3.10, Figura 3.11 e Figura 3.12).

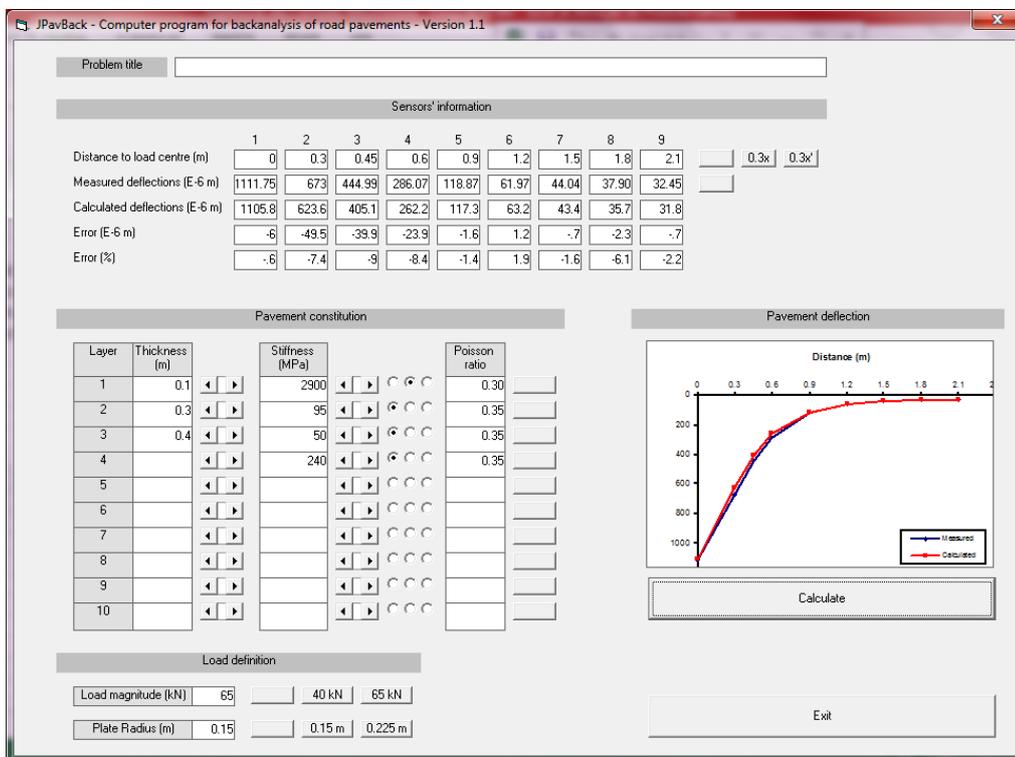


Figura 3.8 - Modelação da zona homogénea 1

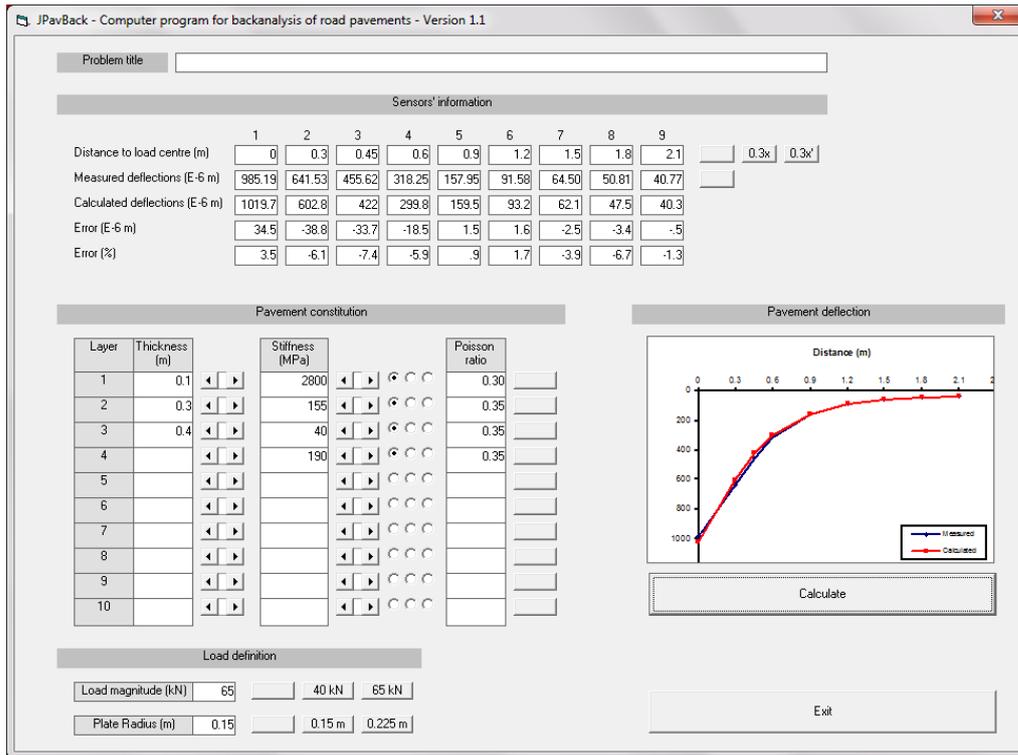


Figura 3.9 - Modelação da zona homogénea 2

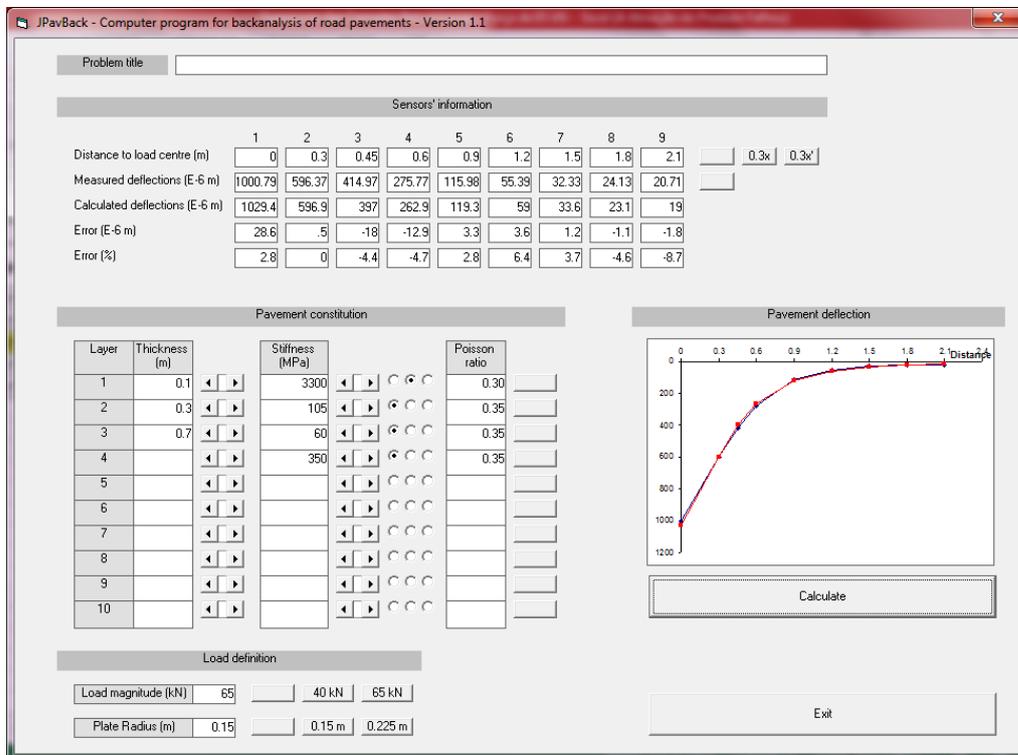


Figura 3.10 - Modelação da zona homogénea 3

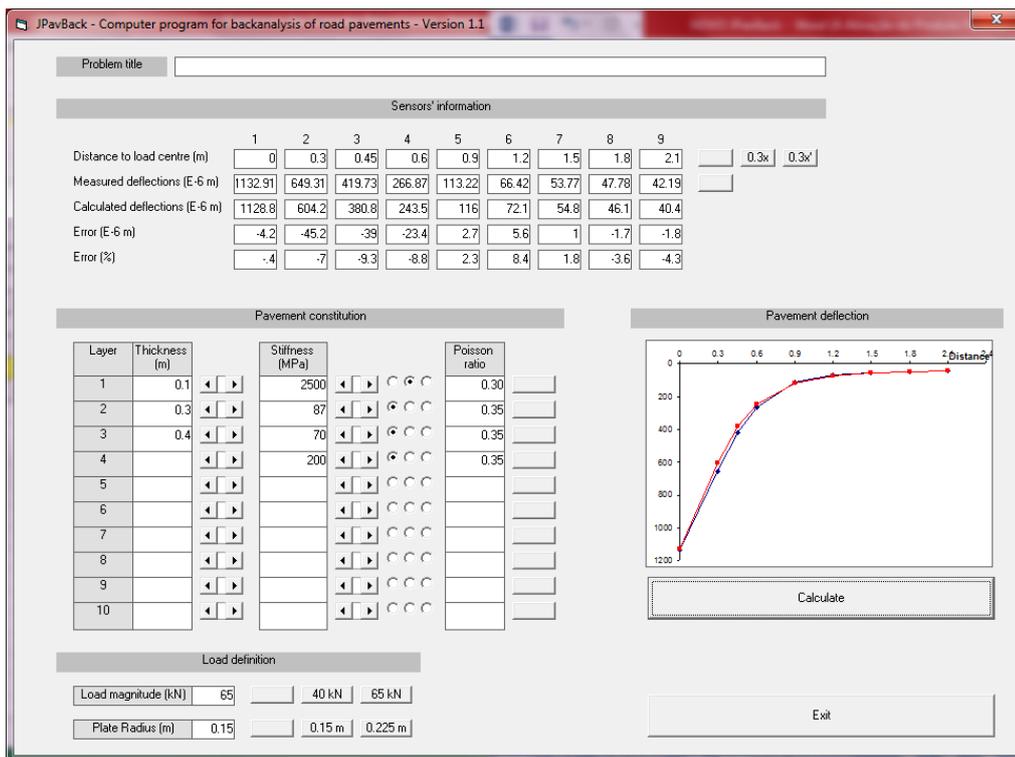


Figura 3.11 - Modelação da zona homogénea 4

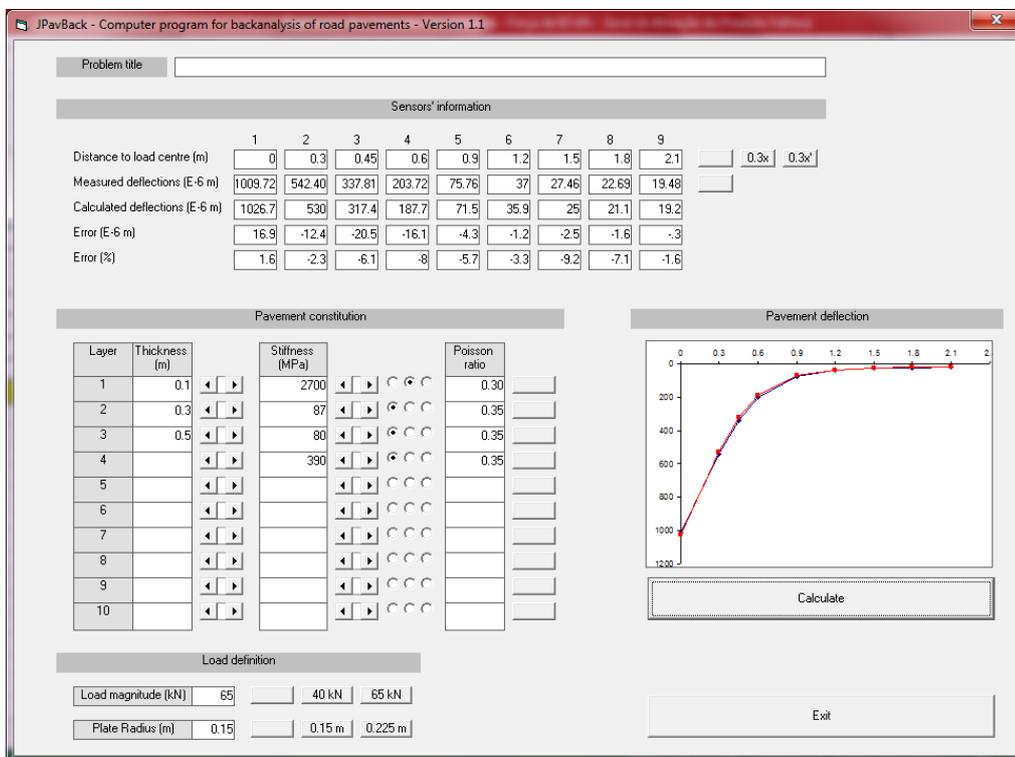


Figura 3.12 - Modelação da zona homogénea 5

Obteve-se assim, os modelos de resposta para as zonas homogéneas (Tabela 3.3), a qual indica os valores dos módulos (E), espessuras (h) e os coeficientes de Poisson ( $\nu$ ).

Tabela 3.3 - Modelos de comportamento do pavimento

Distância (m)	Misturas betuminosas				Camada Granulada			Solo de Fundação		
	E (MPa)	$\nu$	h (m)	T <sub>Ensaio</sub> (°C)	E (MPa)	$\nu$	h (m)	E (MPa)	$\nu$	h (m)
576	2900	0,30	0,10	16,40	95	0,35	0,30	50	0,35	0,40
777	2800	0,30	0,10	16,40	155	0,35	0,30	40	0,35	0,40
1000	3300	0,30	0,10	16,40	105	0,35	0,30	60	0,35	0,70
1432	2500	0,30	0,10	16,40	87	0,35	0,30	70	0,35	0,40
1530	2700	0,30	0,10	16,40	87	0,35	0,30	80	0,35	0,50

Para uma correção dos módulos de deformabilidade devido à temperatura, usa-se os valores das temperaturas médias mensais do ar na região do Bragança (Figura 3.13), publicados pela Fundação Manuel dos Santos (IPMA/MAMAOT) tendo-se obtido um valor de cálculo para a temperatura anual do ar nessa região, igual a 14,6°C.

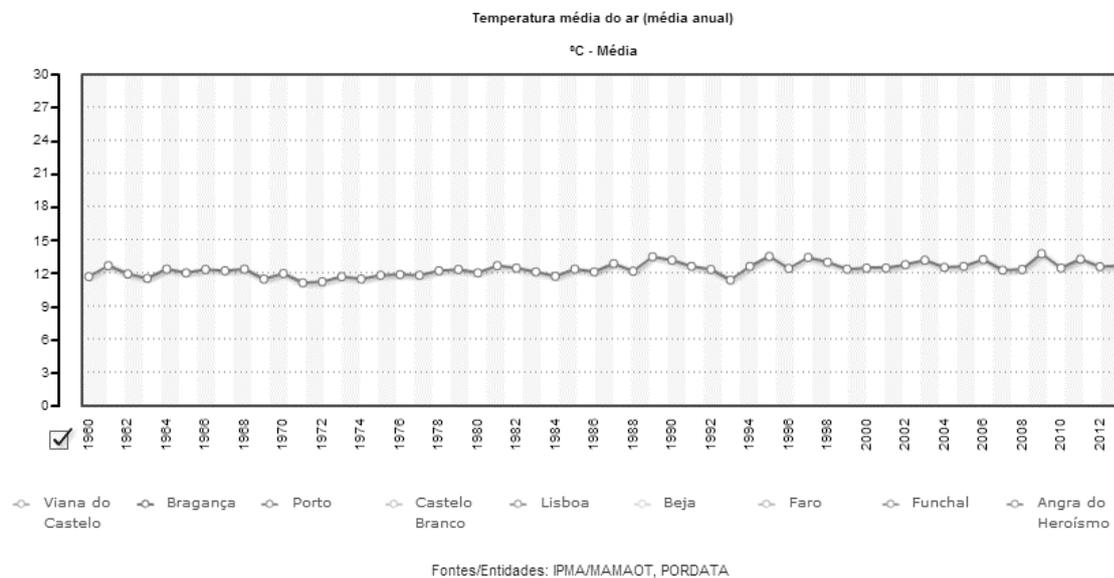


Figura 3.13 - Temperatura média anual

A essa temperatura do ar corresponde uma temperatura de cálculo das camadas betuminosas da ordem de 19,14°C, tendo em atenção as espessuras das camadas dos pavimentos em estudo.

A correção dos módulos de deformabilidade das camadas betuminosas para a temperatura de cálculo efetua-se através da expressão (3.1) (Antunes, 1993):

$$E_t^{MB} = (1,635 - 0,0317 \times t_{med}) \times E_{20^\circ C}^{MB} \quad (3.1)$$

Onde,

$E_t^{MB}$ : Módulo de deformabilidade da mistura betuminosa (MPa);

$t_{med}$ : Temperatura média da mistura betuminosa (°C);

$E_{20^\circ C}^{MB}$ : Módulo de deformabilidade da mistura betuminosa, para a temperatura de referência de 20°C (MPa).

Na Tabela 3.4 apresenta-se os módulos de deformabilidade corrigidos para as temperaturas de cálculo para a pista.

Tabela 3.4 - Módulos de deformabilidade das camadas betuminosas para a temperatura de cálculo

Distância (m)	T <sub>ensaio</sub> (°C)	Mistura betuminosa		
		E <sub>ensaio</sub> (MPa)	T <sub>cálculo</sub> (°C)	E <sub>cálculo</sub> (MPa)
576	19,1	2900	14,6	2825
777	19,1	2800	14,6	2725
1000	19,1	3300	14,6	3210
1432	19,1	2500	14,6	2435
1530	19,1	2700	14,6	2630

Em relação aos efeitos hídricos no comportamento do solo de fundação, estes não se consideraram necessário efetuar correções pois, o ensaio executa-se em períodos de precipitação, pelo que se admite que se estava numa situação desfavorável.

### 3.2.4. Classificação PCN

Para determinar a classificação PCN do pavimento utilizam-se os critérios de dimensionamento apresentados no capítulo anterior, nomeadamente a limitação do fendilhamento por fadiga das

camadas betuminosas e a contribuição da fundação para a formação de deformações permanentes, de acordo com as expressões a seguir apresentadas.

Limitação do fendilhamento por fadiga das camadas betuminosas:

Utiliza-se o critério preconizado pela Shell (1978), dado pela fórmula (3.2):

$$\varepsilon_b = (0,856 \times V_b + 1,08) \times E^{-0,36} \times N^{-0,2} \quad (3.2)$$

Onde,

$\varepsilon_b$ : extensão máxima de tração induzida na camada;

$V_b$ : percentagem volumétrica de betume;

E: módulo de deformabilidade da mistura betuminosa;

N: número de passagens admissível.

Limitação da contribuição da fundação para a formação de deformações permanentes excessivas:

Para verificação desta deformação, adota-se o critério estabelecido por Chou (1982) para pavimentos de aeroportos, dado pela expressão (3.3):

$$\varepsilon_s = 0,00539 \times N^{-0,1436} \quad (3.3)$$

Onde,

$\varepsilon_s$ : extensão vertical de compressão no topo da camada do solo de fundação;

N: correspondente número de passagens admissível.

Na Tabela 3.6 apresenta-se os valores máximos das extensões horizontais de tração ( $\varepsilon_t$ ) e de extensão vertical de compressão máxima ( $\varepsilon_z$ ) correspondentes aos valores limites de PCN, determina-se estas extensões através da utilização do programa JPav (Figura 3.14).

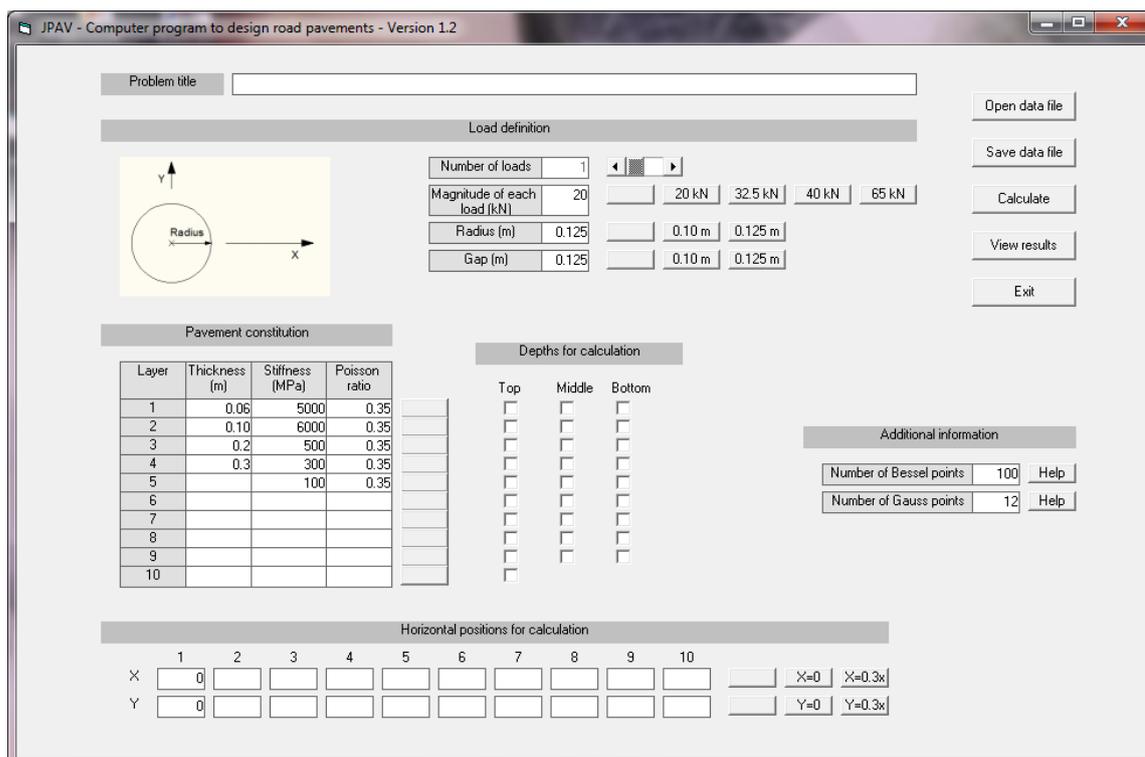


Figura 3.14 - Programa JPav

Para que seja possível retirar os valores das extensões do JPav, necessita-se determinar o raio de acordo com o valor do PCN em estudo (Tabela 3.5).

De seguida, apresenta-se as fórmulas utilizadas para calcular a carga P (3.4) e o raio (3.5).

$$Carga P = \frac{Valor\ do\ PCN \times 9,8}{2} \tag{3.4}$$

$$Raio = \sqrt{\frac{Carga\ P}{\pi \times 1250}} \tag{3.5}$$

Tabela 3.5 - Valores do raio para a determinação das extensões no JPav

PCN	Carga P (kN)	Raio (m)
5	24,50	0,079
6	29,40	0,087
7	34,30	0,093
8	39,20	0,100
9	44,10	0,106
10	49,00	0,112

Tabela 3.6 - Extensões para o PCN das zonas homogêneas

Distância (m)	PCN	Extensões $\epsilon_t$	Limite $\epsilon_t$	Extensões $\epsilon_z$	Limite $\epsilon_z$
576	6	547	605	793	1436
777	9	608	613	1227	1436
1000	7	540	578	761	1436
1432	6	614	638	659	1436
1530	6	596	629	594	1436

A classificação da fundação do pavimento realiza-se de acordo com o instituído pelo ICAO para realizações de classificação ACN-PCN (Tabela 3.7).

Tabela 3.7 - Classe de resistência da fundação

Classe de fundação		Pavimento flexível (%)
<b>A</b>	Elevada	$CBR \geq 13$
<b>B</b>	Média	$8 < CBR < 13$
<b>C</b>	Baixa	$4 < CBR \leq 8$
<b>D</b>	Muito baixa	$CBR \leq 4$

A classificação da resistência da fundação realiza-se com base nos resultados obtidos para os módulos de deformabilidade do solo de fundação por retro-análise, adotando-se a expressão preconizada pela Shell (1978), para estimar o CBR da fundação em função do módulo de deformabilidade dos solos, E (3.6):

$$E \approx 10 \times CBR \tag{3.6}$$

Na Tabela 3.8 apresenta-se a categoria da fundação para o pavimento, tendo em atenção os módulos de deformabilidade obtidos na retro-análise.

Tabela 3.8 - Categoria da fundação

Solo de Fundação, E (MPa)	CBR Estimado (%)	Classificação
50	5	C
40	4	C
60	6	C
70	7	C
80	8	B

Na Tabela 3.9 expõem-se os valores do PCN calculados para o pavimento da pista. De notar ainda que os valores apresentados correspondem à carga máxima admissível que pode efetuar 10000 passagens, como referido anteriormente.

Tabela 3.9 - PCN do pavimento

Valor Numérico do PCN	Pavimento		Categoria da Fundação		Pressão dos Pneus		Modo de avaliação		PCN
	Tipo	Designação	Estimativa do CBR	Designação	Nome	Designação	Nome	Designação	
6	Flexível	F	5	C	Ilimitado	W	Técnica	T	6/F/C/W/T
9	Flexível	F	4	C	Ilimitado	W	Técnica	T	9/F/C/W/T
7	Flexível	F	6	C	Ilimitado	W	Técnica	T	7/F/C/W/T
6	Flexível	F	7	C	Ilimitado	W	Técnica	T	6/F/C/W/T
6	Flexível	F	8	B	Ilimitado	W	Técnica	T	6/F/B/W/T

Tendo-se verificado que o valor numérico mínimo do PCN das zonas homogéneas é de 6 então, concluir-se que o PCN da pista é representado por 6/F/B/W/T, isto é, com capacidade de carga de valor numérico 6, de um pavimento flexível (F), cuja fundação é de categoria media, com valores de CBR entre os 8 e os 13 (B), sem limitação da pressão dos pneus (W), calculado recorrendo à avaliação técnica (T).

### 3.3. Cálculo do PCN utilizando o programa COMFAA

Nesta secção será apresentada a caracterização estrutural do pavimento e a respetiva classificação PCN usando o programa de cálculo COMFAA.

Para este estudo adota-se um CBR de 6 (Classe C), uma vez que corresponde ao valor médio obtido do módulo de deformabilidade da fundação resultante da retro-análise realizada na aplicação do método empírico-mecanicista, tal como se observa na

Tabela 3.10.

Tabela 3.10 - Estimação do CBR no método empírico-mecanicista

Solo de Fundação, E (MPa)	CBR Estimado (%)	Classificação
50	5	C
40	4	C
60	6	C
70	7	C
80	8	B

A vida útil restante será de 20 anos e tal como referido anteriormente, a pista é classificada como pavimento flexível, de modo que existe uma serie de procedimento a ter em conta para este tipo de pavimento.

As características mais importantes para a análise da pista encontram-se definidas na Tabela 3.11. Esta contém as características que importam traduzir para o valor do PCN tendo por base os valores contidos na classificação da FAA 5010.

Outro aspeto a ter em conta são as unidades, uma vez que se utiliza o programa COMFAA em polegadas, daí ser necessário transformar todas as camadas em polegadas, sabendo que uma polegada corresponde a 2,54 cm.

Tabela 3.11 - Propriedades do pavimento

<b>Data de construção</b>	1972
<b>Camada betuminosa</b>	10 cm / 3,937 in.
<b>Camada granular</b>	30 cm / 11,811 in.
<b>CBR</b>	6
<b>Vida útil restante (anos)</b>	20
<b>Classificação FAA 5010</b>	S ou SW

Relativamente às classificações das FAA, as quais são publicadas no Diretório do Aeródromo (AFD) ou no Registo Mestre do Aeródromo (FAA Form 5010), acredita-se ter por base o seguinte padrão do avião:

- S ou SW: Roda Única;
- D ou DW: Roda dupla;
- DT ou DTW: Duas rodas Tandem;

- DDT ou DDTW: Roda Tandem dupla.

Para que se consiga elaborar uma avaliação relativamente aproximada da classificação utilizada pela FAA 5010 (pois os aviões que opera no Aeródromo de Bragança, não constam na lista da FAA) foi necessário faz corresponder cada avião ao tipo de padrão, isto é ao tipo de engrenagem que utiliza.

Relativamente aos aviões que utilizam a pista de voo, estima-se que todos pertencem ao grupo S ou SW, como se observa na Figura 3.15, Figura 3.16, Figura 3.17, Figura 3.18 e Figura 3.19.



Figura 3.15 - Dornier 228 (Enc24)



Figura 3.16 - ATR 42-300 (Enc24)



Figura 3.17 - Piper Seneca (Enc24)



Figura 3.18 - Cessna 172 (Enc24)



Figura 3.19 - Morane Saulnier 893 (Enc24)

### 3.3.1. Avaliação da espessura

A espessura equivalente a utilizar no programa COMFAA é obtida através de uma folha de cálculo EXCEL, assumindo a espessura mínima da camada betuminosa e da camada granular, e para a fundação uma espessura variável.

Quando não existe mistura de tráfego com quatro ou mais rodas no trem de aterragem principal, como é o caso em estudo, a camada estrutural mínima para a camada betuminosa é de 3 polegadas e para a camada de base (material granular de alta qualidade) a espessura é de 6 polegadas (DeBord, 2012).

Deste modo, a secção de referência do pavimento a modelar no programa é a indicada na Tabela 3.12.

Tabela 3.12 - Referência da espessura do pavimento flexível pela FAA (DeBord, 2012)

<b>Camada estrutural</b>	<b>Menos de quatro rodas (in.)</b>
Camada betuminosa (P-401)	3
Material granular de alta qualidade (P-209)	6

Sabendo a espessura do pavimento, necessita-se ajustar os fatores de equivalência recomendados. Estes fatores de equivalência encontram-se na Figura 3.20.

Structural Item	Description	Range Convert to P-209	Recommended Convert to P-209	Range Convert to P-154	Recommended Convert to P-154
P-501	Portland Cement Concrete (PCC)	--	--	--	--
P-401	Plant Mix Bituminous Pavements (HMA)	1.2 to 1.6	1.6	1.7 to 2.3	2.3
P-403	Plant Mix Bituminous Pavements (HMA)	1.2 to 1.6	1.6	1.7 to 2.3	2.3
P-306	Econocrete Subbase Course (ESC)	1.2 to 1.6	1.2	1.6 to 2.3	1.6
P-304	Cement Treated Base Course (CTB)	1.2 to 1.6	1.2	1.6 to 2.3	1.6
P-212	Shell Base Course	--	--	--	--
P-213	Sand-Clay Base Course	--	--	--	--
P-220	Caliche Base Course	--	--	--	--
P-209	Crushed Aggregate Base Course	1.0	1.0	1.2 to 1.6	1.4
P-208	Aggregate Base Course	1.0	1.0	1.0 to 1.5	1.2
P-211	Lime Rock Base Course	1.0	1.0	1.0 to 1.5	1.2
P-301	Soil-Cement Base Course	n/a	--	1.0 to 1.5	1.2
P-154	Subbase Course	n/a	--	1.0	1.0
P-501	Portland Cement Concrete (PCC)	Range Convert to P-401 2.2 to 2.5, Recommended 2.5			

Figura 3.20 - Fatores de equivalência dos pavimentos flexíveis

Os fatores de equivalência substituem os valores individuais de cada camada, pois estes são afetados pela qualidade do material. Nesta seleção deve ter-se em consideração a espessura total do pavimento e a espessura de cada camada individualmente.

Para determinação destes fatores de equivalência, supõe-se que a camada betuminosa é constituída por mistura betuminosa (P-401) e a camada de base é constituída por agregado britado (P-209).

A Figura 3.21 apresenta a folha de cálculo EXCEL, onde se demonstra o procedimento de cálculo da espessura equivalente.

A camada de P-401 (camada betuminosa constituída por mistura betuminosa) na célula G6 é convertida para P-209 (camada de base é constituída por agregado britado). Da mesma forma,

a camada do P-209 (camada de base é constituída por agregado britado) em G9 célula é convertida para P-154 (camada de sub-base).

	A	B	D	E	F	G	H	
2	Reference Guidance AC 150/5335-5B Appendix A-2 Fig. A2-2			Convert to P-209		Convert to P-154		
3	Flexible Pavement Structure Items			Existing Flexible Pavement Layers		Existing Layer Thickness		
4		1.5	1.6	1.0				
5	P-401	1.5	1.6	1.0		P-401	3.9 in.	
6	P-306	1.4	1.4	1.8	5	P-306	0.0 in.	
7	P-304	1.4	1.4	1.0	1	P-304	0.0 in.	
8	P-209	1.0	1.0	1.4	5	P-209	11.8 in.	
9	P-208	1.0	1.0	1.0	1	P-208	0.0 in.	
10	P-301	n/a	1.0	1.0	2	P-301	0.0 in.	
11	P-154	n/a	1.0	1.0	1	P-154	0.0 in.	
12	Aircraft GW > 100kip?						Total	
13	Equivalent Thickness, mm						Subgrade CBR...	6.0
14		P-401	3.0					
15		P-209	6.0					
16		P-154	10.2					
17		Total	19.2					
18	COMFAA Parameters for							
19	Evaluation thickness t = 19.2 in.							
20	Evaluation CBR = 6.0							
21	Recommended PCN Codes: F/C/X							
22	ENTER Reference Section Requirements							
23	P-401 reference t	3.00	in.					
24	P-209 reference t	6.00	in.					

Project Details

Pavimento flexível. CBR de 6 e base de 11,8 inches. A vida do pavimento é de 20 anos

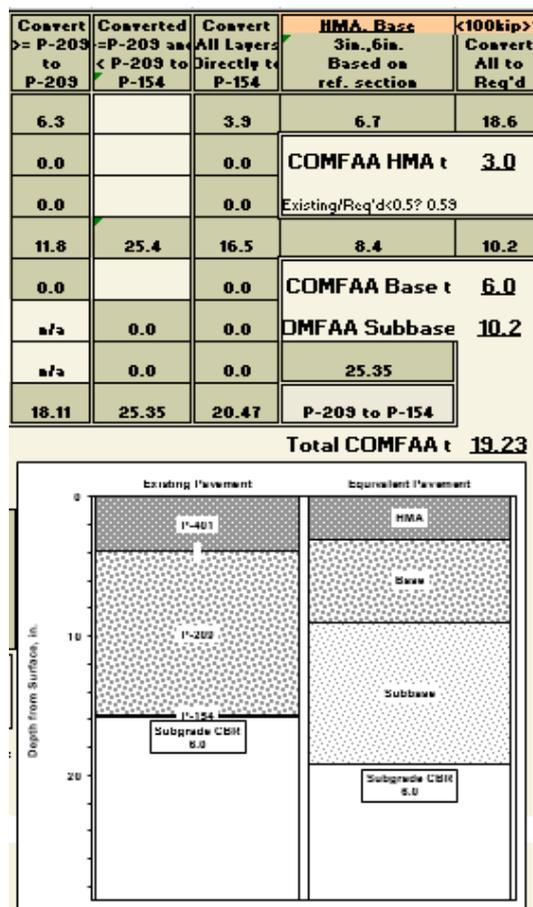


Figura 3.21 - Folha EXCEL para cálculo da camada do pavimento equivalente

### 3.3.2. Cálculo do PCN

Para o cálculo do PCN no software COMFAA, começa-se por inserir um novo avião, pois os aviões utilizados no Aeródromo de Bragança, não se encontram na base de dados deste.

Para criar um avião necessita-se das características como:

- Peso bruto do avião;
- Percentagem do peso bruto do avião;
- Número máximo de rodas por engrenagem;
- Número máximo de engrenagem por avião;
- Pressão dos pneus;
- Passagem para o ciclo de tráfego;
- Saídas anuais.

De acordo com as características da Tabela 3.1, e tendo especial atenção aos aviões existentes na base de dados do programa COMFAA, necessita-se de alguns ajustes tendo em conta o seu peso, dado que serão criados ficheiros com o nome dos aviões que utilizam a pista do Aeroporto de Bragança.

Assim, utilizam-se os valores constantes na Tabela 3.14, Tabela 3.15 para a definição dos aviões. Relativamente às partidas anuais sabe-se que existem 1483 operações anuais (SENER), e conhece-se a percentagem de saídas anuais de cada avião (Tabela 3.1) portanto, pode-se calcular as saídas anuais (Tabela 3.13).

Calcula-se também a pressão dos pneus, como se observa na Tabela 3.14. As restantes características introduzidas no programa de cálculo COMFAA, encontra-se na Tabela 3.15.

Tabela 3.13 - Saídas anuais

Tipo de avião	% de saídas anuais	Partidas Anuais
Dornier 228	30,8	457
ATR 42-300	7,7	114
Piper Seneca	15,4	228
Cessna 172	15,4	228
Morane Saulnier 893	30,8	457

Tabela 3.14 - Pressão dos pneus (Air31)

Tipo de avião	Pressão (MPa)	Pressão (psi)
Dornier 228	0,98	142,14
ATR 42-800	0,72	104,43
Piper Seneca	0,38	55,11
Cessna 172	0,19	27,56
Morane Saulnier 893	0,15	21,76

Tabela 3.15 - Características introduzidas no COMFAA

Tipo de avião	Dornier 228	ATR 42-300	Piper Seneca	Cessna 172	Morane Saulnier 893
Peso bruto (lbs)	12,5	40	5	2	2
% Peso bruto	100	100	100	100	100
Nº de engrenagens principais	2	2	2	2	2
Nº de rodas das engrenagens principais	1	1	1	1	1
Pressão (psi)	142,14	104,43	55,11	30	30
Alfa utilizado	0	0	0	0	0

Tipo de avião	Dornier 228	ATR 42-300	Piper Seneca	Cessna 172	Morane Saulnier 893
Ciclo da passagem de tráfego	2	2	2	2	2
Saídas anuais	457	114	228	228	457
“Flex 20yr Cors”	1	713	699	599	1
“Rig 20yr Cors”	1	713	699	599	1
"Rígido Cutoff (time rrs)"	3	3	3	3	3
"Concrete Flex. Str (psi)"	650	650	650	650	650

Como se verifica, os valores da pressão dos pneus (Tabela 3.14) difere dos da Tabela 3.15 porque o programa de cálculo COMFAA não permite introduzir pressões tão reduzidas com as do avião tipo Cessna 172 e Morane Saulnier 893, pelo que opta-se por um valor relativamente aproximado.

Da Figura 3.22 até à Figura 3.28, observa-se os passos da introdução dos valores no programa COMFAA para o avião Dornier 228, sendo os restantes colocados da mesma forma.

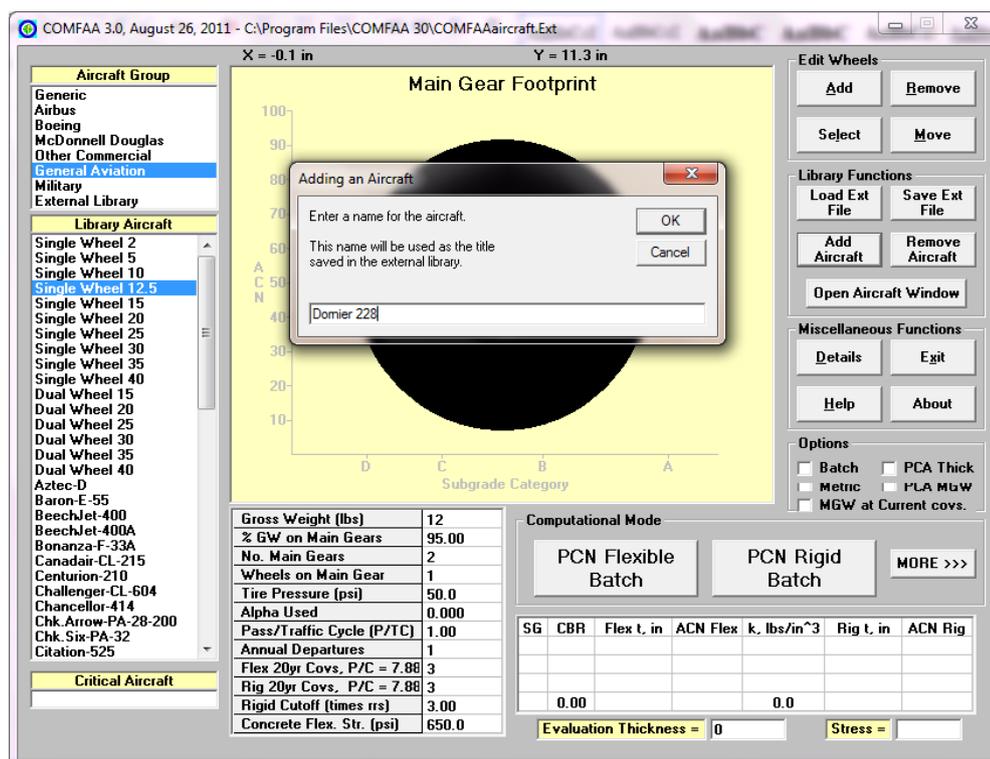


Figura 3.22 - Introdução do nome do avião

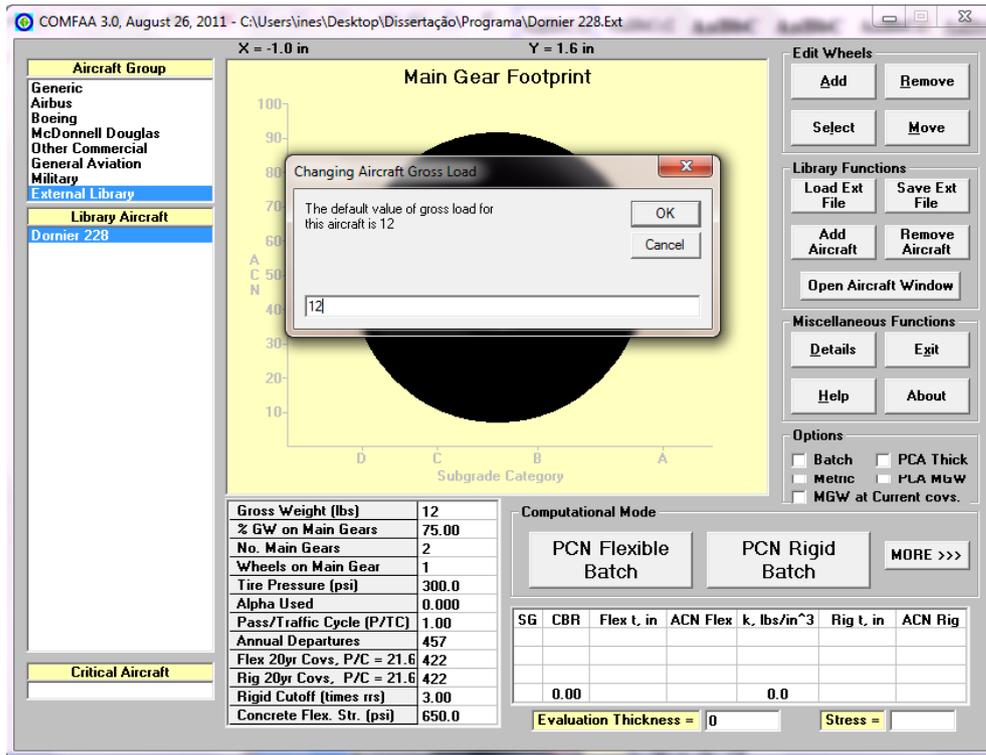


Figura 3.23 - Introdução do peso bruto

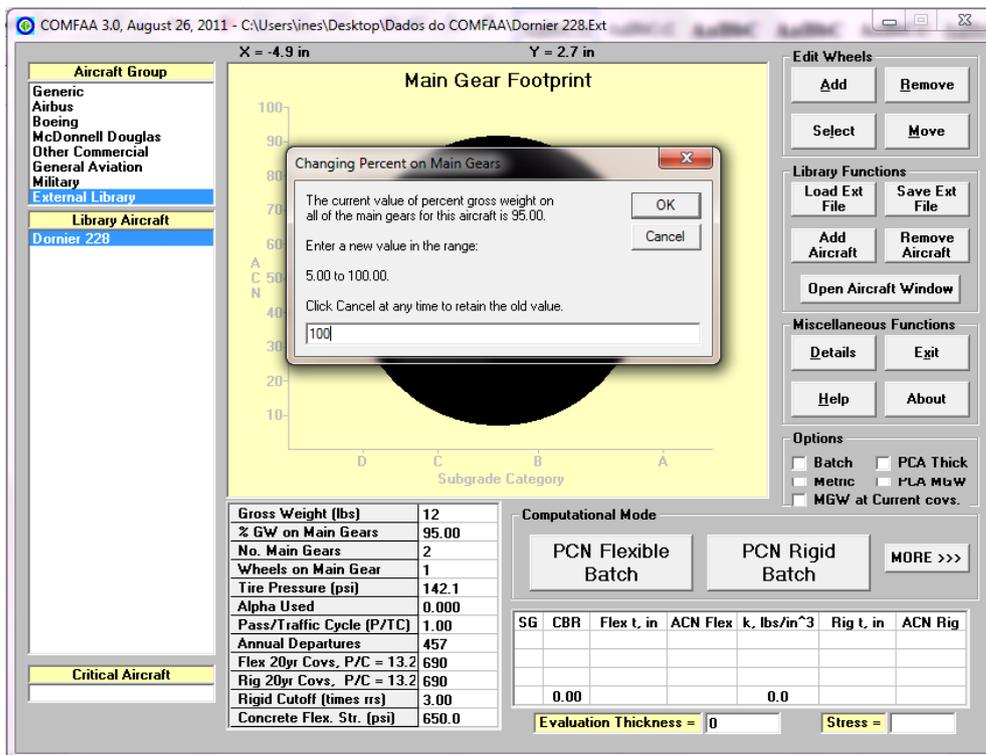


Figura 3.24 - Introdução da percentagem do peso bruto

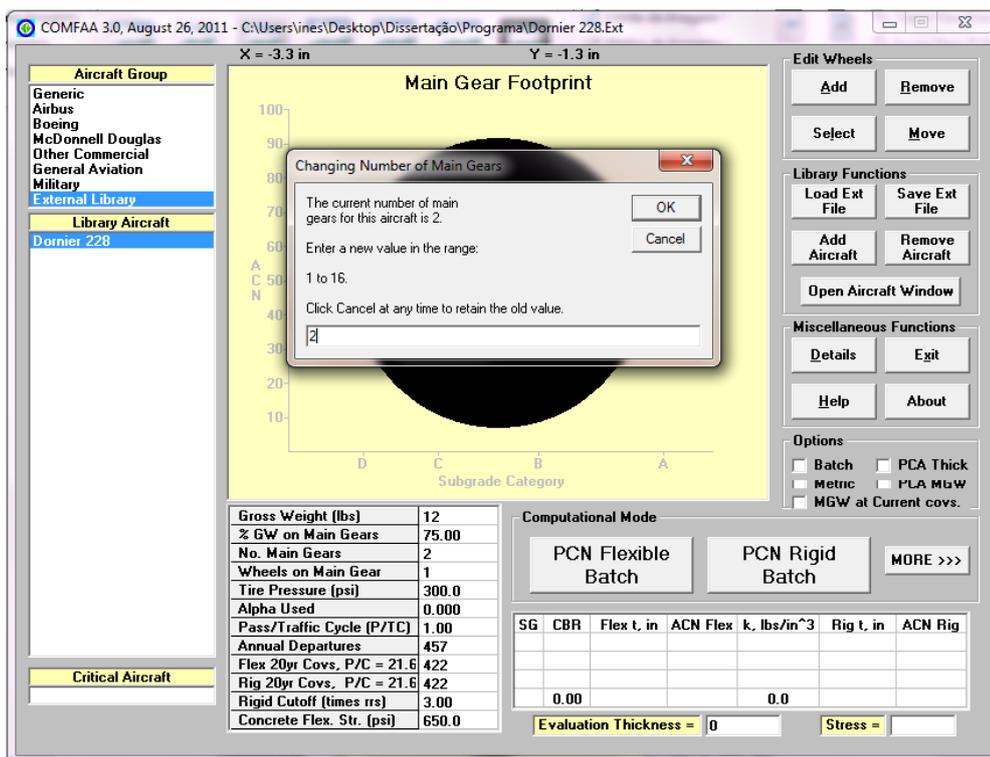


Figura 3.25 - Introdução do número de engrenagens principais

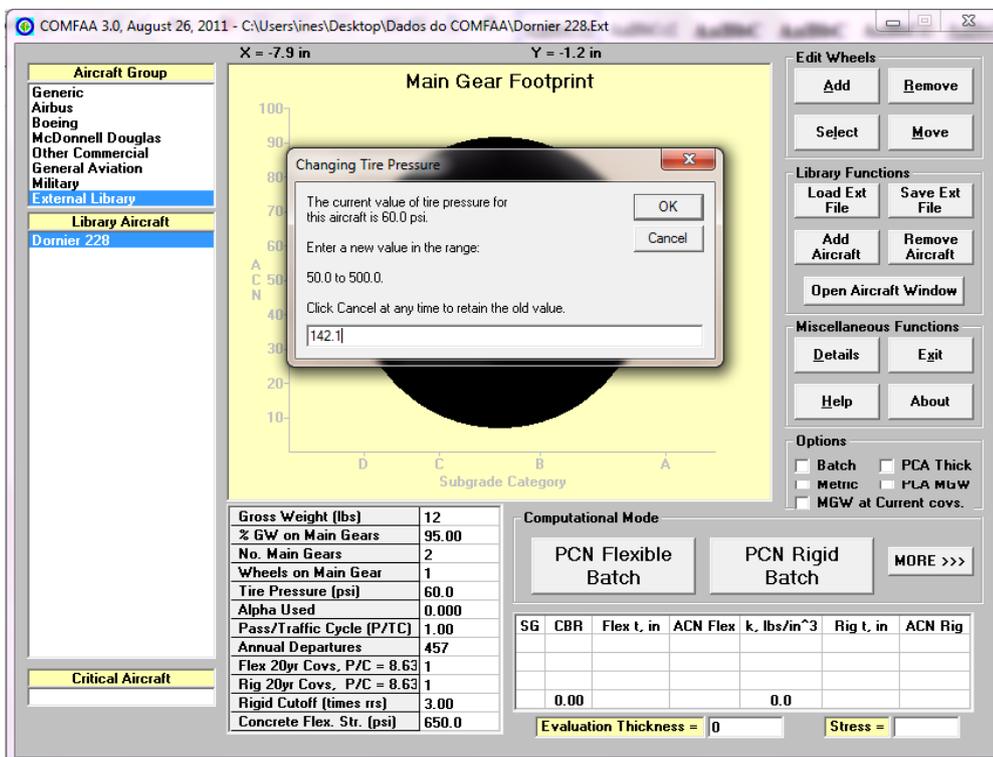


Figura 3.26 - Introdução da pressão dos pneus

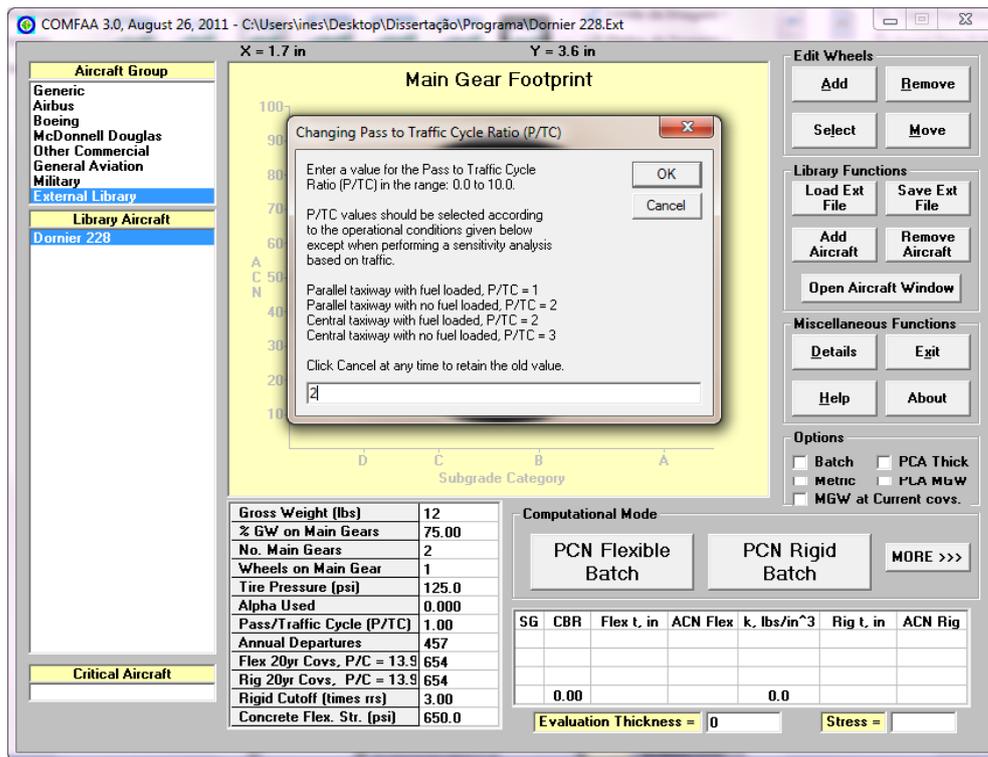


Figura 3.27 - Introdução do ciclo de passagem do tráfego

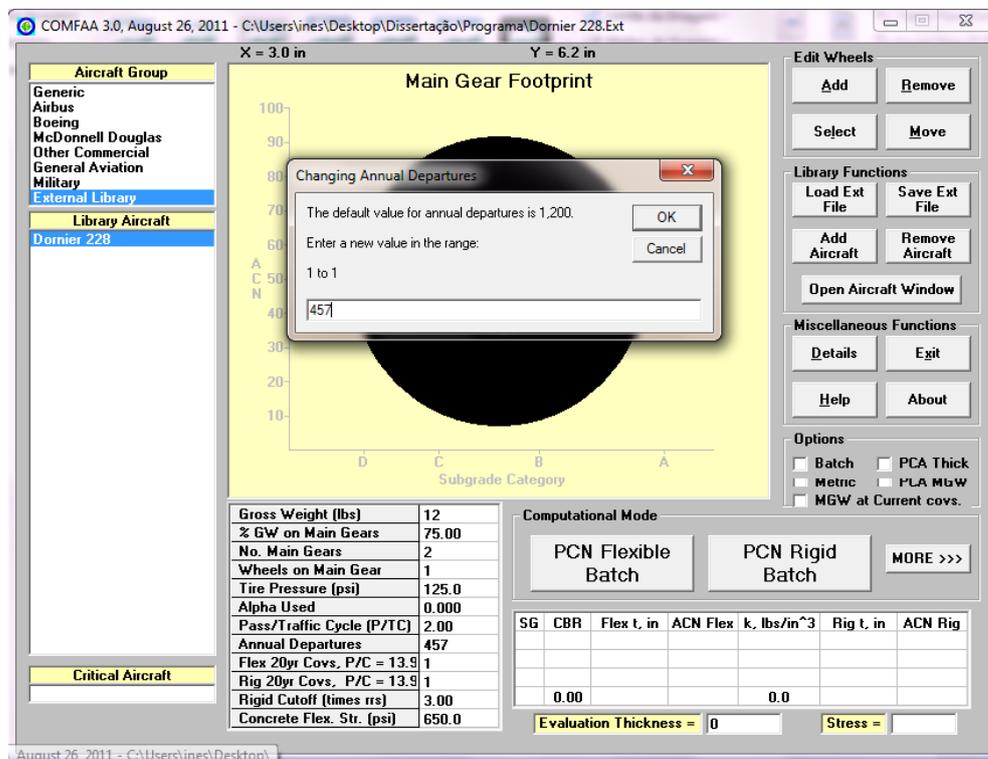


Figura 3.28 - Introdução das saídas anuais

Depois de introduzidos todas as características do avião, introduz-se o valor do CBR (Figura 3.29) e o valor da espessura em avaliação que foi retirada da folha de cálculo EXCEL (Figura 3.30).

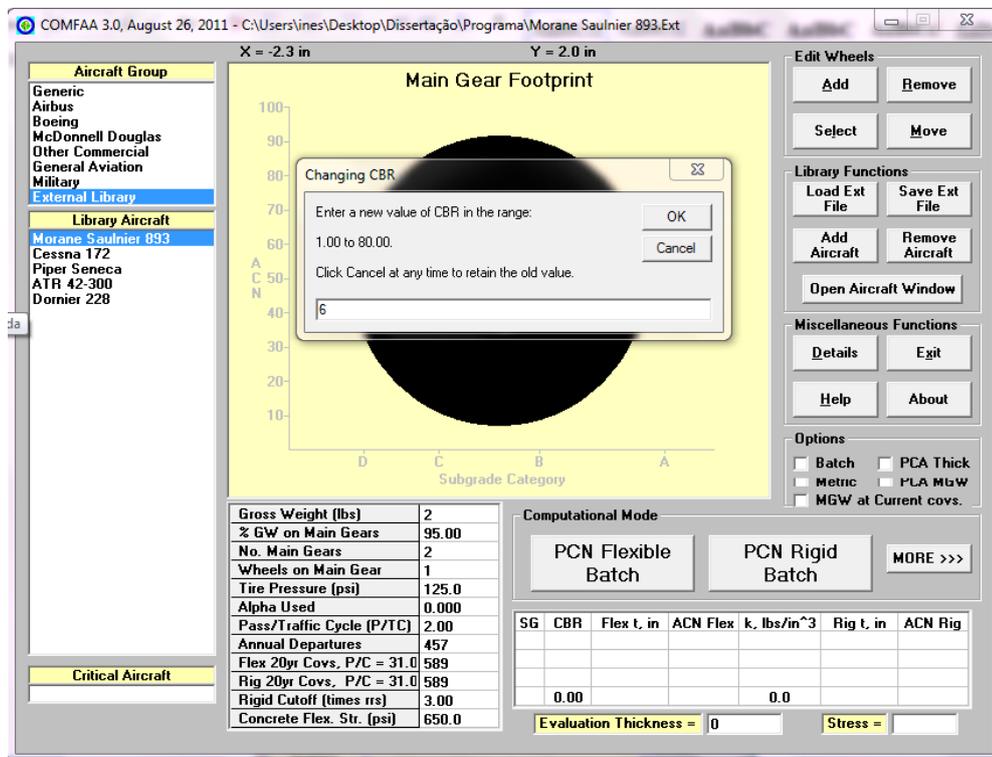


Figura 3.29 - Introdução do valor do CBR

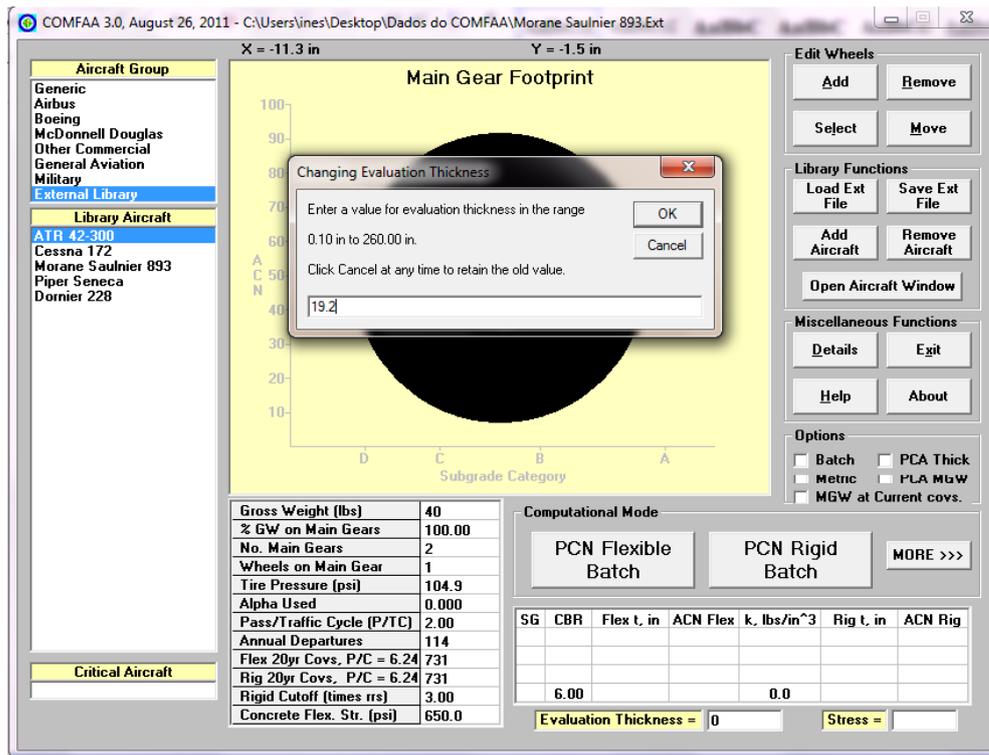


Figura 3.30 - Introdução da espessura equivalente

Colocados todos os aviões, seleciona-se o botão “Batch” (Figura 3.31), e pressiona-se no botão “PCN Flexible Batch” (Figura 3.32).

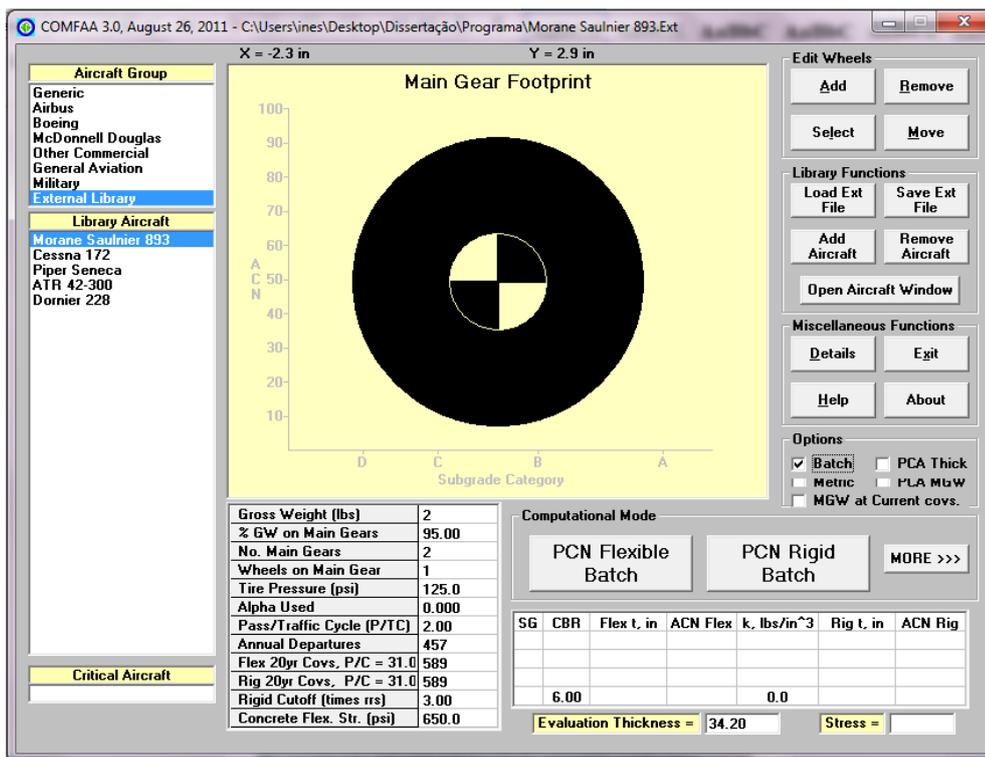


Figura 3.31 - Seleção do botão "Batch"

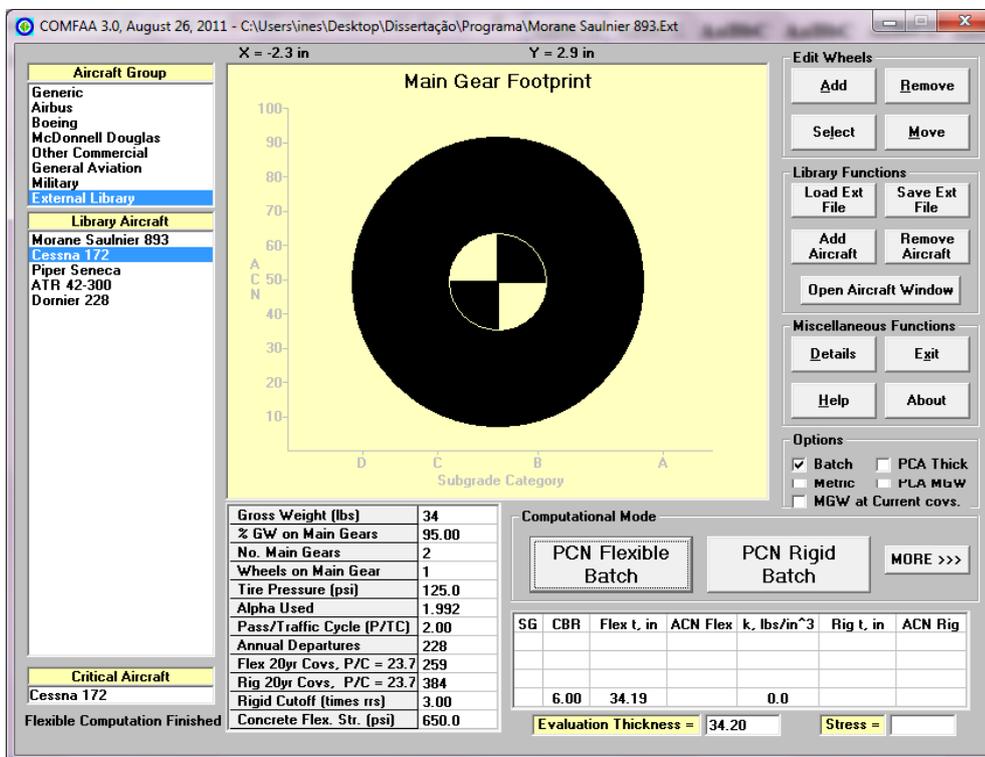


Figura 3.32 - Seleção do botão "PCN Flexible Batch"

Selecionado o botão “Details” (Figura 3.33), apresentam-se os resultados do cálculo do PCN.

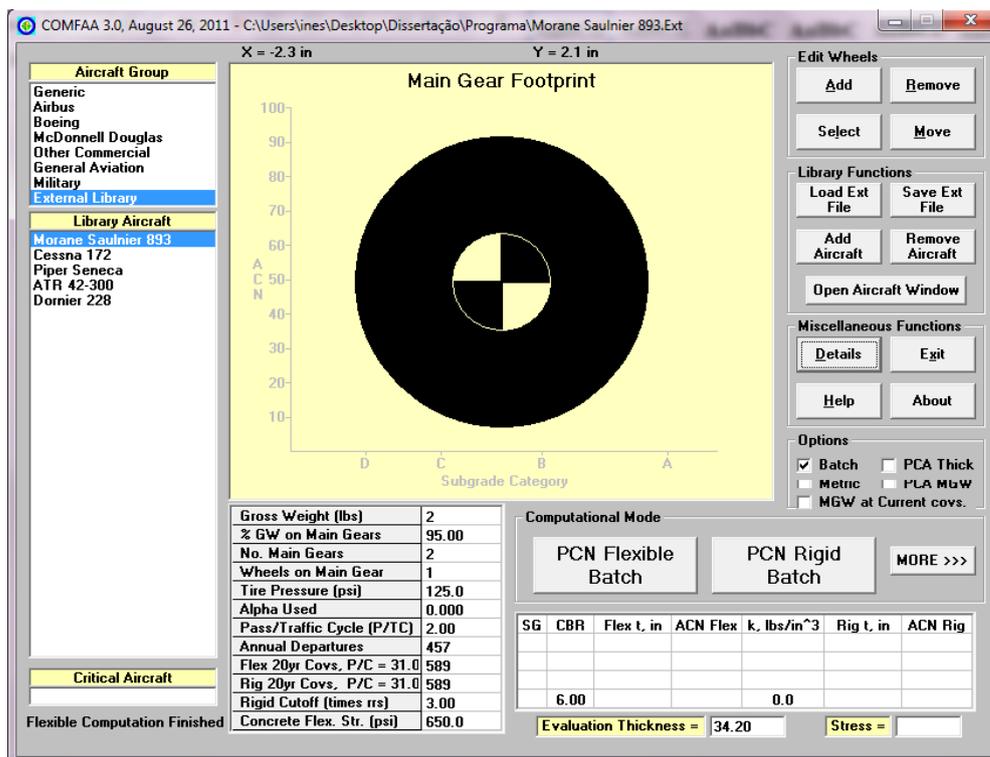


Figura 3.33 - Seleção do botão "Details"

Inicialmente, as características do pavimento e do tráfego são apresentadas como resultados de saída, juntamente com a categoria de fundação. Seguidamente, aparecem os dados do tráfego de entrada como se observa na Figura 3.34.

Observando os resultados de saída (Figura 3.34) verifica-se que a maioria dos aviões que utiliza o Aeroporto de Bragança possuem um PCN de 4, mas existe um avião (ATR 42-300) que pode ser considerado o mais gravoso com um PCN de 28.

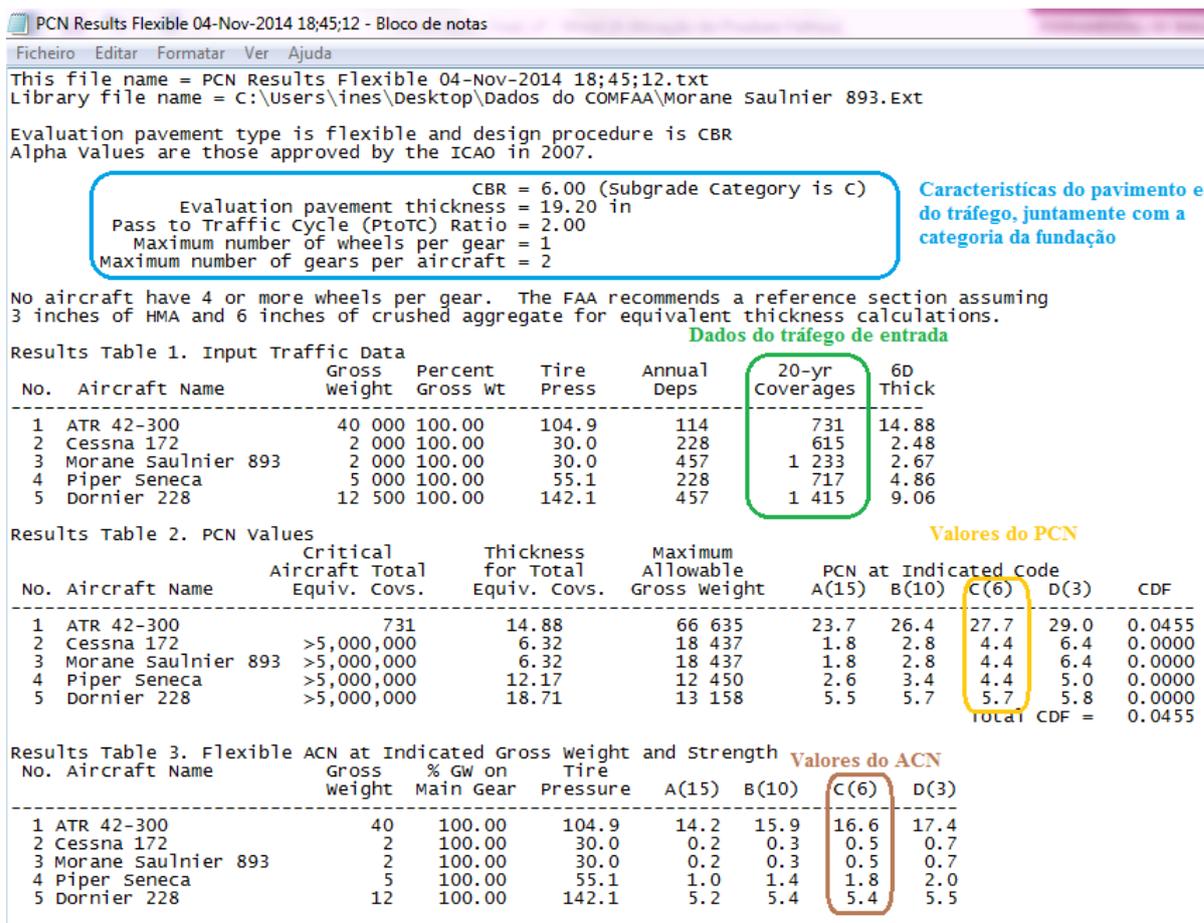


Figura 3.34 - Resultados de saída do programa COMFAA

Sabendo que o PCN é avaliado tendo em conta o ACN do avião crítico, então poder-se-á concluir que o avião crítico é o ATR 42-300, pois é o que apresenta um valor de ACN maior (16,6).

Deste modo, a notificação do PCN, tendo em conta os códigos associados ao valor do PCN, será 28/F/B/Y/U corresponde a um pavimento com capacidade de carga de valor numérico 28, de um pavimento flexível (F), cuja fundação é de categoria media, com valores de CBR entre os 8 e os 13 (B), com pressão máxima de enchimento de pneus admissível igual a 104,43 psi (Y) e cuja avaliação é baseada na experiência com aviões que operam usualmente no pavimento (U).



## 4. CONCLUSÃO

Esta dissertação iniciou-se com um enquadramento do tema, no qual se explica o significado do Número de Classificação do Avião (ACN) e do Número Classificação Numérica do Pavimento (PCN). Estes conceitos são de muita importância, pois sem o seu entendimento torna-se difícil compreender o trabalho realizado.

De seguida explicou-se de uma forma genérica a metodologia do cálculo do PCN, que consiste no objetivo principal desta dissertação.

A metodologia do cálculo do PCN pode ser realizada através de dois métodos, como se observou no Capítulo 2 e 3 desta dissertação. O primeiro método, método da FAA, utilizando o programa de cálculo COMFAA, que tem como dados de saída não só o valor numérico do PCN, mas também do ACN, tendo em conta os aviões que operam no aeroporto. O segundo método é formado pelo método empírico-mecanicista de dimensionamento/avaliação de pavimentos que permite o cálculo do PCN, independentemente do avião.

Relativamente ao método da FAA utilizando o programa de cálculo COMFAA, este consiste na determinação da espessura equivalente de forma a ajustar o pavimento existente aos fatores de equivalência designados pela FAA. De seguida introduz-se todos os dados necessários no programa COMFAA e ele exibe como dados de saída os valores do PCN e do ACN.

O método empírico-mecanicista necessita de ensaios como o defletómetro de impacto e a medição da temperatura. Através destes ensaios é possível determinar as deflexões normalizadas, o módulo de deformabilidade do pavimento e o valor do CBR. Através da medição de temperatura é possível retirar o módulo de deformabilidade da camada betuminosa ajustada à temperatura anual da região em estudo.

Ambos os métodos foram aplicados ao Aeroporto de Bragança, sendo possível retirar o valor do PCN. De acordo com o método empírico-mecanicista, obteve-se um PCN máximo de 9 enquanto na utilização do método da FAA adquiriu-se um PCN de 28.

Estes valores encontram-se bastante diferentes, pois o método empírico-mecanicista é independente do avião, enquanto o método da FAA calcula o PCN de todos os aviões em estudo.

Verificando a carta do Aeródromo Municipal de Bragança, pode concluir-se que o valor numérico do PCN reportado é de 19, valor dentro do intervalo obtido.

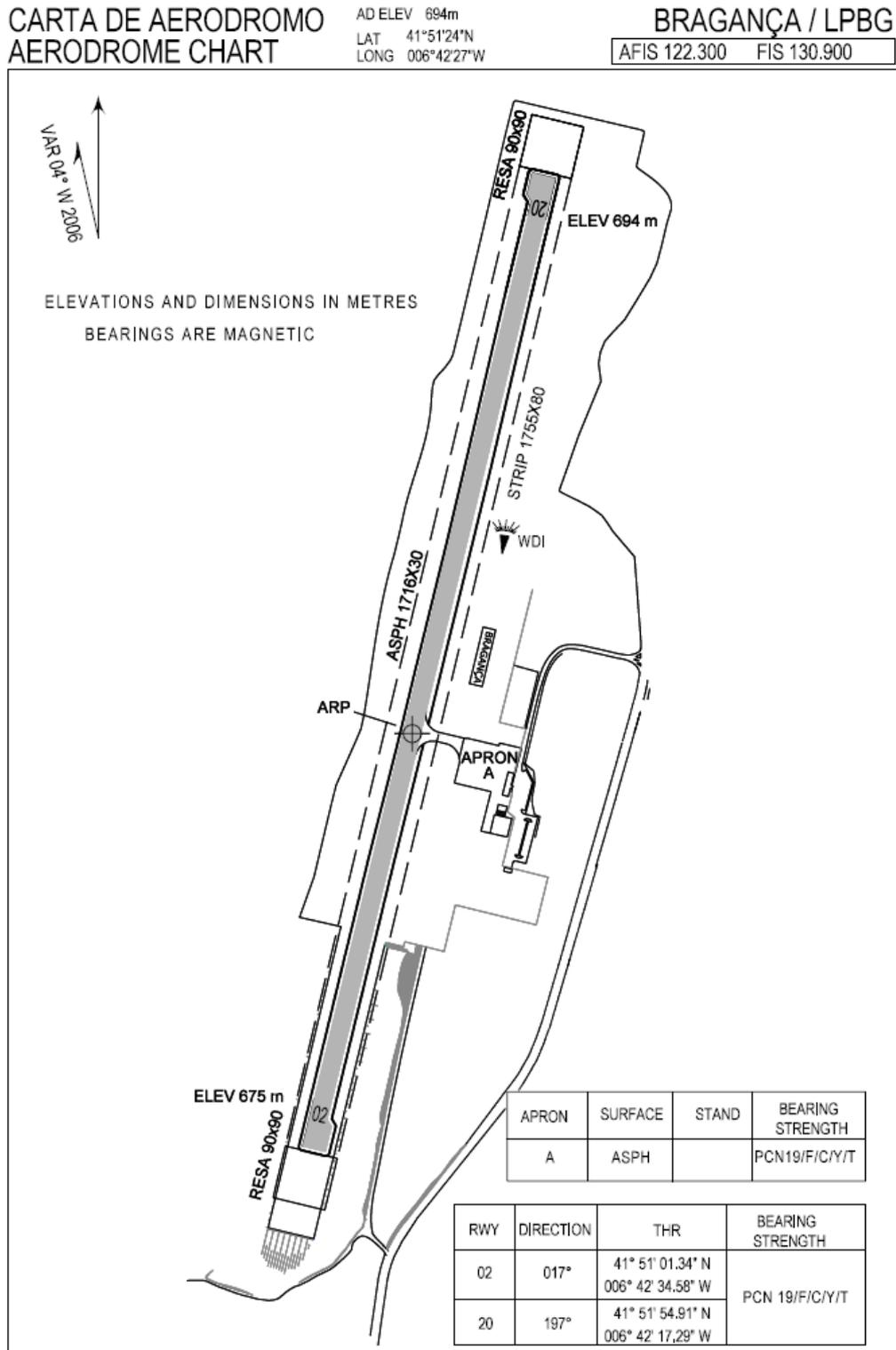


Figura 4.1 - Carta do Aeródromo Municipal de Bragança (Lalyre, 2012)

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**AASHTO 1961.** *The AASHTO Road Test: History and Description of the Project.* s.l.. Highway Research Board's Special Report 61A, 1961.

**AC 150/5335-5A 2006.** *Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength - PCN.* 2006.

**Alves, T. S. F. 2007.** *Metodologias de Auscultação de Pavimentos Rodoviários, Aplicação Prática do Radar de Prospecção e do Defletómetro de Impacto.* Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2007.

**Alexandre L. J. 2008.** *Determinação do PCN e Projeto de Reforço do Pátio Militar da Base Aérea de Salvador (BASV).* 2008.

**ANAC 2008.** *Resistência de Pavimentos dos Aeródromos.* Brasília, 2008

**Antunes, M. L. 1993.** *Avaliação da capacidade de carga de pavimentos utilizando ensaios dinâmicos.* Tese de Doutoramento, Lisboa, 1993.

**Chou, Y. T. 1982.** *Structural Behaviour of Flexible Airfield Pavements.* Trondheim, Norway : Proceedings of the Bearing Capacity of Roads and Airfield, 1982.

**DeBord, K. 2012.** *Calculating PCN using the FAA Method.* 2012.

**Domingos, P. 2007.** *Reforço de Pavimentos Rígidos: Modelação do Comportamento Estrutural.* Lisboa : Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2007.

**Enc24.** Enciclopédia de Aeronaves. *flugzeuginfo.net.* [Online] Agosto 2014, 24. [Cited: Outubro 31, 2014.] <http://www.flugzeuginfo.net/>.

**Fonseca, P. J. R. 2013.** *Análise Comparativa de Dimensionamento de Pavimento Flexível aeropotuário pelos Métodos Mecanicista e Empírico da Federal Aviation Administration (FAA).* Fortaleza, 2013.

**Fontul, S. 2004.** *Structural Evaluation of Flexible Pavements Using Non-Destructive.* s.l. : Dissertation developed at Laboratório Nacional de Engenharia Civil, submitted the Universidade de Coimbra for the Degree of Doctor of Philosophy in Civil, 2004.

**ICAO. 1983.** *Aerodrome Design Manual – Part3 – Pavements.* 1983.

**INAC I. P. 2012,** *Regulamento sobre a classificação da capacidade de carga de pavimentos aeronáuticos através da utilização da metodologia ACN/PCN.* Ministério da Economia e d Emprego, 2012.

**IPMA/MAMAOT.** *Base de Dados Portugal Contemporâneo.* [Online] [Cited: Julho 23, 2014.] [http://www.pordata.pt/Portugal/Temperatura+media+do+ar+\(media+anual\)-1067](http://www.pordata.pt/Portugal/Temperatura+media+do+ar+(media+anual)-1067).

**Lalyre, M. C. G. 2012.** *Bragança Regional Airport Master Plan Evaluation - Geometrical and Structural Characteristics.* Bragança : s.n., 2012.

**Serviço Metereológico Nacional. 1970.** *O Clima de Portugal.* Lisboa : Fascículo XIII, 2ª, 1970.

**SHELL. 1978.** *Shell Pavement Design Manual – Asphalt Pavements and Overlays for Road Traffic.* London, UK : Shell International Petroleum Company, 1978.

## 6. ANEXO

### Tabelas do ACN

#### *AIRCRAFT CLASSIFICATION NUMBERS (ACN's)*

<i>Aircraft</i>	<i>Weight Max/Min (kN)</i>	<i>Tire Pressure (MPa)</i>	<i>Flexible Pavement Subgrades CBR</i>				<i>Rigid Pavement Subgrades k (MPa/m)</i>			
			<i>High</i>	<i>Medium</i>	<i>Low</i>	<i>Vr Low</i>	<i>High</i>	<i>Medium</i>	<i>Low</i>	<i>Ult Low</i>
			<i>A 15</i>	<i>B 10</i>	<i>C 6</i>	<i>D 3</i>	<i>A 150</i>	<i>B 80</i>	<i>C 40</i>	<i>D 20</i>
A340-200	2706 1697	1.42	62 35	67 37	78 41	106 53	53 33	62 34	73 39	85 45
A340-300	2559 1706	1.32	56 34	61 36	70 40	96 52	47 32	54 33	65 38	76 44
A340-300	2706 1765	1.42	62 37	68 39	79 44	107 57	54 34	62 36	74 42	86 48
A340-500, 600	3590 1750	1.42	70 29	76 31	90 34	121 42	60 29	70 28	83 32	97 37
A380-800 (6 Wheel Main Gear)	5514 2758	1.47	71 29	79 31	99 35	136 48	53 25	61 26	76 29	94 34
A380-800 (4 Wheel Wing Gear)	5514 2758	1.47	62 27	68 28	80 31	108 39	55 25	64 26	76 30	88 35
Antonov AN- 24	207 130	0.42	6 4	8 5	11 6	13 7	8 5	9 5	11 6	11 7
Antonov AN-124-100	3844 2000	1.03	51 20	60 23	77 27	107 40	35 17	48 18	73 23	100 32
Antonov AN-225	5884 4500	1.13	63 41	75 48	95 62	132 88	45 30	61 39	89 55	125 75
ATR 42 (Aerospatiale)	182 110	0.72	9 5	10 5	11 6	13 7	10 6	11 6	12 7	12 7
ATR 72 (Aerospatiale)	211 125	0.79	11 6	12 6	14 7	15 8	13 7	14 7	14 8	15 8
Aurora (CP-140) (P-3 Orion)	600 275	1.31	35 14	38 14	42 16	45 18	41 16	43 17	45 18	46 19
B-52 (Bomber)	2170 1500	1.65	80 49	86 53	97 60	116 72	103 62	114 70	126 77	136 85
B1-B Bomber (Rockwell)	2123 1400	1.65	77 43	87 47	102 57	121 72	77 43	90 50	102 58	113 65

**AIRCRAFT CLASSIFICATION NUMBERS (ACN's)**

<i>Aircraft</i>	<i>Weight Max/Min (kN)</i>	<i>Tire Pressure (MPa)</i>	<i>Flexible Pavement Subgrades CBR</i>				<i>Rigid Pavement Subgrades k (MPa/m)</i>				
			<i>High</i>	<i>Medium</i>	<i>Low</i>	<i>Vr Low</i>	<i>High</i>	<i>Medium</i>	<i>Low</i>	<i>Ult Low</i>	
			<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	
			<i>15</i>	<i>10</i>	<i>6</i>	<i>3</i>	<i>150</i>	<i>80</i>	<i>40</i>	<i>20</i>	
Beech Queen Air 65, 70, 80 Series	40 25	0.33	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Bombardier BD-700 (Global Express)	432 220	1.21	26 11	28 12	30 13	32 15	30 13	31 14	32 15	33 15	
C-141B Starlifter (Lockheed)	1553 600	1.31	52 15	60 16	73 18	88 24	51 14	61 16	70 19	78 22	
C-17A (Globemaster III)	2602 2000	0.95	54 38	61 42	73 50	94 65	54 41	49 38	57 40	71 48	
C-5A Galaxy (Lockheed)	3421 1500	0.73	27 10	30 11	35 12	46 15	25 10	28 11	33 12	39 13	
C123K Provider (Fairchild/Republic)	267 180	0.69	20 13	22 15	24 16	25 17	21 14	21 14	22 15	22 15	
Canadair CL-215, 415	196 130	0.55	12 8	15 10	17 11	18 12	14 9	14 10	15 10	15 10	
Canadair CL-41A (CT-114 Tutor)	49 24	0.37	—	—	—	—	—	—	—	—	
Canadair Regional Jet - 100, 200 Srs	236 135	1.12	13 7	14 7	16 8	17 9	16 8	16 9	17 9	18 9	
Canadair Regional Jet - 700 Series	335 195	1.24	18 10	19 10	21 11	24 13	21 11	22 12	23 12	24 13	
Canadair Regional Jet - 900, ER Srs	367 215	1.24	20 11	21 11	24 12	26 14	23 12	25 13	26 14	27 14	
Cessna 114B (Commander)	15 10	0.35	—	—	—	—	—	—	—	—	
Cessna 152	8 5	0.20	—	—	—	—	—	—	—	—	
Cessna 172 (Skyhawk)	11 7	0.19	—	—	—	—	—	—	—	—	
Cessna 180 (Skywagon)	13 8	0.21	—	—	—	—	—	—	—	—	

*AIRCRAFT CLASSIFICATION NUMBERS (ACN's)*

<i>Aircraft</i>	<i>Weight Max/Min (kN)</i>	<i>Tire Pressure (MPa)</i>	<i>Flexible Pavement Subgrades CBR</i>				<i>Rigid Pavement Subgrades k (MPa/m)</i>			
			<i>High</i>	<i>Medium</i>	<i>Low</i>	<i>Vr Low</i>	<i>High</i>	<i>Medium</i>	<i>Low</i>	<i>Ult Low</i>
			<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
			<i>15</i>	<i>10</i>	<i>6</i>	<i>3</i>	<i>150</i>	<i>80</i>	<i>40</i>	<i>20</i>
DHS-2 Conair Firecat	116 80	0.62	8 6	10 7	10 7	11 8	9 6	9 6	10 7	10 7
Domier 228 Series	63 56	0.90	5 5	6 5	6 5	6 5	6 5	6 5	6 5	6 5
Domier 328 Jet	155 93	1.13	8 4	8 5	10 5	11 6	10 5	10 6	11 6	11 6
Domier 328-110 (Turboprop)	138 90	0.80	7 4	7 4	8 5	10 6	8 5	8 5	9 5	9 6
Domier SA227, Metro Merlin, Expediter	74 56	0.73	3 2	4 3	4 3	5 4	4 3	5 3	5 4	5 4
Douglas A-26 Invader	120 90	0.48	7 5	8 6	10 7	11 8	8 6	9 6	9 7	9 7
Douglas B-26 Invader	156 105	0.48	9 6	11 7	13 9	14 9	10 7	11 7	11 8	12 8
Embraer EMB-110 (Bandeirante)	59 56	0.62	4 4	5 5	5 5	5 5	5 4	5 4	5 5	5 5
Embraer EMB-120 (Brasilia)	119 71	0.76	5 3	6 3	7 4	8 4	7 4	7 4	7 4	8 4
Embraer ERJ-145	217 110	0.90	12 5	13 6	15 6	16 7	14 6	15 7	15 7	16 7
Fokker 100	452 243	0.94	25 12	27 13	31 14	33 16	28 13	30 14	32 15	33 16
Fokker 50	205 125	0.59	9 5	11 6	13 7	14 8	11 6	12 7	13 7	13 8
Fokker 60	226 131	0.62	10 5	13 6	14 7	16 9	13 6	14 7	14 8	15 8

**AIRCRAFT CLASSIFICATION NUMBERS (ACN's)**

<i>Aircraft</i>	<i>Weight Max/Min (kN)</i>	<i>Tire Pressure (MPa)</i>	<i>Flexible Pavement Subgrades CBR</i>				<i>Rigid Pavement Subgrades k (MPa/m)</i>			
			<i>High</i>	<i>Medium</i>	<i>Low</i>	<i>Vr Low</i>	<i>High</i>	<i>Medium</i>	<i>Low</i>	<i>Ult Low</i>
			<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
			<i>15</i>	<i>10</i>	<i>6</i>	<i>3</i>	<i>150</i>	<i>80</i>	<i>40</i>	<i>20</i>
MD-81	628 350	1.14	36 18	38 19	43 21	46 24	41 20	43 21	45 23	47 24
MD-82	670 350	1.14	39 18	41 18	46 20	49 24	43 20	46 21	48 22	50 24
MD-83	716 355	1.14	42 18	45 19	50 21	53 24	47 20	50 22	52 23	54 24
MD-87	628 335	1.14	36 17	38 18	43 20	46 23	41 19	43 20	45 22	47 23
MD-88	670 350	1.14	39 18	41 19	46 21	50 24	44 20	46 21	48 23	50 24
MD-90-30	699 392	1.14	41 20	43 21	48 24	52 27	46 23	48 24	50 26	52 27
MD-90-30ER	739 392	1.14	44 20	47 21	52 24	55 27	49 23	52 24	54 26	56 27
MD-90-50, 55	772 410	1.14	46 22	50 22	54 25	57 29	52 24	54 26	57 27	58 28
Mitsubishi MU-2 Srs	52 32	0.48	— —	— —	— —	— —	— —	— —	— —	— —
Piper Aerostar	29 20	0.48	— —	— —	— —	— —	— —	— —	— —	— —
Piper Apache	21 13	0.29	— —	— —	— —	— —	— —	— —	— —	— —
Piper Archer II, III	12 7	0.17	— —	— —	— —	— —	— —	— —	— —	— —
Piper Arrow III, IV	14 8	0.21	— —	— —	— —	— —	— —	— —	— —	— —
Piper Aztec	30 18	0.42	— —	— —	— —	— —	— —	— —	— —	— —

**AIRCRAFT CLASSIFICATION NUMBERS (ACN's)**

Aircraft	Weight Max/Min (kN)	Tire Pressure (MPa)	Flexible Pavement Subgrades				Rigid Pavement Subgrades			
			CBR				k (MPa/m)			
			High A 15	Medium B 10	Low C 6	Vr Low D 3	High A 150	Medium B 80	Low C 40	Ult Low D 20
Piper Comanche	21 13	0.29	—	—	—	—	—	—	—	—
Piper Cub (& Super Cub)	8 5	0.13	—	—	—	—	—	—	—	—
Piper Dakota	14 8	0.17	—	—	—	—	—	—	—	—
Piper Malibu, Mirage, Meridian	21 14	0.35	—	—	—	—	—	—	—	—
Piper Mojave	33 23	0.42	—	—	—	—	—	—	—	—
Piper Navajo	29 18	0.42	—	—	—	—	—	—	—	—
Piper Saratoga	16 10	0.38	—	—	—	—	—	—	—	—
Piper Saratoga II	16 11	0.27	—	—	—	—	—	—	—	—
Piper Seminole	17 11	0.25	—	—	—	—	—	—	—	—
Piper Seneca III, V	22 14	0.38	—	—	—	—	—	—	—	—
Piper Warrior II,III	11 7	0.17	—	—	—	—	—	—	—	—
Saab 2000	226 136	0.69	11 6	13 7	14 7	16 9	13 7	14 8	15 8	15 9
Saab 340 A, B	131 81	0.82	6 4	7 4	8 4	9 5	7 4	8 5	8 5	9 5
Shorts 330	102 66	0.55	6 4	8 5	9 6	9 6	7 5	8 5	8 5	8 5