



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

MATHEUS BRENO PIRES BARBOSA

ANÁLISE DA CAPACIDADE ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS
AEROPORTUÁRIOS

FORTALEZA
2019

MATHEUS BRENO PIRES BARBOSA

ANÁLISE DA CAPACIDADE ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS

Projeto de Graduação apresentado à
Universidade Federal do Ceará, como requisito
parcial à obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda
de Oliveira.

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- B199a Barbosa, Matheus Breno Pires.
Análise da Capacidade Estrutural de Pavimentos Aeroportuários / Matheus Breno Pires Barbosa. –
2019.
59 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2019.
Orientação: Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira.
1. Capacidade estrutural. 2. FWD. 3. Método ACN-PCN. I. Título.

CDD 620

MATHEUS BRENO PIRES BARBOSA

ANÁLISE DA CAPACIDADE ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS

Projeto de Graduação apresentado à
Universidade Federal do Ceará, como requisito
parcial à obtenção do título de Engenheiro Civil.

Aprovada em: 09/12/2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Arielle Elias Arantes
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra. Cláudia Azevedo Pereira
Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)

A Deus.

Aos meus pais, Agaci e Valdenia.

Aos meus irmãos, Kaio e Bárbara.

A toda minha família.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por sua infinita bondade e amor, por permitir que eu realizasse este sonho e por todas as pessoas boas que ele colocou em minha vida.

Agradeço a meus pais, Agaci e Valdenia, por todo o amor e paciência, por sempre estarem ao meu lado e me apoiarem em todas as empreitadas da vida, se hoje sou ou tenho algo é graças a eles. Aos meus irmãos, Kaio e Bárbara, pelas inúmeras brigas que tivemos e todas as nossas brincadeiras, apesar de não parecer, eu amo vocês.

A toda minha família, meus avós maternos Maria do Carmo e Elias, meus avós paternos Manoel e Rocilda, a todos os meus tios e tias, primos e primas. Em especial quero agradecer minha madrinha Edilene, padrinho Pedro e tia Aurilene, por terem me acolhido em suas casas quando me mudei para Fortaleza, por sua paciência nesse tempo e por todos os conselhos e palavras de apoio.

Ao professor Heber por sua orientação e enorme paciência comigo desde os tempos de bolsista. Agradeço ainda pelas brincadeiras, que eu não sabia se eram brincadeiras ou estava falando sério, e palavras de apoio durante todo esse tempo que nos conhecemos.

Aos meus amigos de turma, pelas inúmeras brincadeiras e conversas, inclusive em horas inapropriadas. Senhores foi um prazer fazer parte desta “Panelinha” durante a “Resolução de questões” nos tempos de faculdade. Como diria o grande pensador contemporâneo Barney Stinson, “Não importa o que você faça na vida. Não vai ser lendário, a menos que seus amigos estejam lá para ver.”.

RESUMO

A capacidade estrutural de pavimentos aeroportuários pode ser expressa na forma do *Pavement Classification Number* (PCN), ele é um dos principais parâmetros para auxílio à tomada de decisão dos operadores de aeródromo quanto a operacionalidade de aeronaves em seus pavimentos. O Método ACN-PCN (*Aircraft Classification Number – Pavement Classification Number*) visa associar, de forma simples, um número de classificação das aeronaves com um número de classificação dos pavimentos. Assim, sempre que a classificação do pavimento for maior que a da aeronave, esta pode operar sem restrições. Este trabalho foi realizado utilizando resultados de ensaios *Falling Weight Deflectometer* (FWD) e dados de operação de aeronaves em uma *taxiway* de um aeroporto brasileiro, objetivando analisar a capacidade estrutural do pavimento e determinar seu PCN. Foram realizados estudos e determinação do *mix* de aeronaves, retroanálise das deflexões, determinação da vida útil do pavimento e do seu PCN. Os estudos revelaram altos valores de Módulo de Resiliência na retroanálise e vida útil da ordem de milhares de anos, o que indica uma alta capacidade de suporte. Além disso, o PCN encontrado é muito maior que o ACN de qualquer aeronave que trafegou durante o período dessa análise. De forma geral, verificou-se que o pavimento estudado se encontra em excelente condição estrutural e que ele pode durar muitos anos, a depender das atividades de manutenção e reabilitação que forem executadas.

Palavras-chave: Capacidade estrutural. FWD. Método ACN-PCN.

ABSTRACT

The structural capacity of airport pavements can be expressed in the form of the Pavement Classification Number (PCN), it is one of the main parameters to assist the decision making of aerodrome operators regarding the operationality of aircraft on their pavements. The Aircraft Classification Number (ACN-PCN) Method aims to simply associate an aircraft classification number with a pavement classification number. Thus, whenever the pavement rating is higher than that of the aircraft, it can operate without restrictions. This work was carried out using Falling Weight Deflectometer (FWD) test results and aircraft operation data in a taxiway of a Brazilian airport, aiming to analyze the structural capacity of the pavement and determine its PCN. Studies and determination of the aircraft mix, backanalysis of deflections, determination of the pavement life and its PCN were performed. Studies have shown high values of Modulus of Resilience in backanalysis and lifetime of thousands of years, indicating a high carrying capacity. In addition, the PCN found is much higher than the ACN of any aircraft that flew during the period of this analysis. In general, it was found that the pavement studied is in excellent structural condition and that it can last many years, depending on the maintenance and rehabilitation activities that are performed.

Keywords: Structural capacity. FWD. ACN-PCN method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura típica de pavimento flexível.....	18
Figura 2 - Estrutura típica de pavimento rígido.....	18
Figura 3 - Escala do PCI.....	20
Figura 4 - PCI Crítico de Manutenção e de Serviço.....	20
Figura 5 - FWD sobre reboque para realização de ensaio.....	22
Figura 6 - Detalhe dos sensores e pesos batentes do FWD.....	23
Figura 7 - Exemplo de planilha de resultados de FWD.....	23
Figura 8 - Esquema de bacia de deflexão.....	24
Figura 9 - Carrinho com GPR acoplado para operação manual.....	25
Figura 10 - Principais componentes de um DCP.....	26
Figura 11 - Ponta cônica do DCP padrão.....	27
Figura 12 - Estrutura e organização dos resultados.....	31
Figura 13 - Perfil do pavimento estudado e valores iniciais de Mr.....	34

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Diferença acumulada versus Ponto de aplicação – Eixo da Taxiway M.....	39
Gráfico 2 - Diferença acumulada versus Ponto de aplicação - 6 m a direita do eixo da Taxiway M.....	40
Gráfico 3 - Diferença acumulada versus Ponto de aplicação - 6 m a esquerda do eixo da Taxiway M.....	41
Gráfico 4 - Resultados da análise do COMFAA 3.0 para o mix médio	44
Gráfico 5 - Evolução do PCN nos 5 anos analisados	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Resistência do subleito para pavimentos rígidos	28
Tabela 2-Resistência do subleito para pavimentos flexíveis	29
Tabela 3-Pressão de pneus máxima permitida para pavimentos flexíveis ou mistos	29
Tabela 4 - Parâmetro z em relação ao número de amostras.....	33
Tabela 5 - Aeronaves com 2% ou mais de operações nos anos de 2013 a 2017	37
Tabela 6 - Porcentagem média das operações das aeronaves nos 5 anos analisados	38
Tabela 7 - Mix de aeronaves utilizado no estudo	39
Tabela 8 - Resumo dos segmentos homogêneos	41
Tabela 9 - Médias dos resultados de Módulo de Resiliência para cada SH	42
Tabela 10 - Resultados de vida útil obtidos pelo FAARFIELD para cada SH	43

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Problema de Pesquisa	15
1.2	Objetivos	15
1.3	Estrutura do Trabalho	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Pavimentos Aeroportuários	17
2.2	Avaliação de Pavimentos Aeroportuários	19
2.2.1	<i>Avaliação Funcional</i>	19
2.2.2	<i>Avaliação Estrutural</i>	20
2.3	<i>Falling Weight Deflectometer – FWD e Heavy Weight Deflectometer - HWD</i>	21
2.4	<i>Ground Penetrating Radar – GPR</i>	24
2.5	Sondagens e Dynamic Cone Penetrometer (DCP)	25
2.6	Capacidade Estrutural de Pavimentos Aeroportuários – Método ACN-PCN	27
3	MÉTODO DE PESQUISA	31
3.1	Determinação da área de estudo	31
3.2	Determinação dos segmentos homogêneos e análise estatística das deflexões recuperáveis	32
3.3	Tráfego de aeronaves	33
3.4	Retroanálise do pavimento	34
3.5	Estimativa da vida útil do pavimento	35
3.6	Determinação do PCN	35
4	ANÁLISES E DISCUSSÕES	37
4.1	Determinação do mix de aeronaves	37
4.2	Determinação dos segmentos homogêneos e análise das deflexões recuperáveis	39
4.3	Retroanálise – <i>software</i> BAKFAA	42
4.4	Determinação da vida útil do pavimento – <i>software</i> FAARFIELD	43
4.5	Determinação do PCN – <i>software</i> COMFAA	44
4.6	Limitações da análise	46
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	47

5.1	Principais Conclusões.....	47
5.2	Principais limitações.....	48
5.3	Sugestões para trabalhos futuros	49
	REFERÊNCIAS	50
	APÊNDICE A – MIX DE AERONAVES REPRESENTATIVO PARA OS ANOS ENTRE 2013 E 2017	53
	APÊNDICE B – RESULTADOS DO TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS ENSAIOS FWD.....	54
	APÊNDICE C – PCN PARA O MIX DE AERONAVES DE 2013	55
	APÊNDICE D – PCN PARA O MIX DE AERONAVES DE 2014.....	55
	APÊNDICE E – PCN PARA O MIX DE AERONAVES DE 2015.....	57
	APÊNDICE F – PCN PARA O MIX DE AERONAVES DE 2016.....	58
	APÊNDICE G – PCN PARA O MIX DE AERONAVES DE 2017.....	59

1 INTRODUÇÃO

A aviação comercial brasileira teve seu início na década de 30, quando suas empresas pioneiras começavam a estabelecer suas primeiras rotas. Era, então, estabelecido um novo modo de locomoção para os brasileiros. Segundo Ferreira (2017) inicialmente o transporte aéreo era utilizado apenas pela parte mais rica e influente da sociedade, sendo um sinônimo de luxo, *status* e *glamour*, a partir dos anos 90 houve uma democratização e maior acessibilidade desse modal de transporte.

De acordo com o Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil (MTPA, 2018), em 2018 o Brasil contava com uma infraestrutura operante de 112 aeródromos públicos recebendo voos regulares e 1806 privados, com 18 aeroportos recebendo voos internacionais, 81 fora das capitais, em operação para voos regulares e 10 concedidos. Ainda sob instrução do MTPA (2018), de 2010 até 2015 houve um crescimento de aproximadamente 37,8% na quantidade de passageiros pagos transportados no setor aéreo, com queda de 7,13% no ano seguinte e retomada do crescimento de 2,74% em 2017.

Com o aumento nos números de passageiros transportados é natural que haja um considerável aumento no número de operações nos aeródromos e/ou do tamanho das aeronaves junto com sua modernização, sendo assim necessário que se tenha uma estrutura capaz de garantir conforto e segurança integralmente aos usuários, o que demanda uma modernização das infraestruturas dos aeródromos quando se diz respeito ao terminal de passageiros e os pavimentos constituintes do mesmo. Para Oliveira (2008 e 2009), os pavimentos aeroportuários devem proporcionar aos seus usuários um nível de serviço elevado com o objetivo de garantir condições mínimas de segurança operacional, reduzindo os acidentes e/ou incidentes envolvendo aeronaves.

As pistas de pouso e decolagem, pátios e pistas de táxi devem possuir uma estrutura sólida e confiável, capaz de resistir aos esforços e carregamentos oriundos do tráfego de aeronaves para o qual o aeródromo a que pertencem é designado, sem apresentar avarias e/ou deformações excessivas. Segundo a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC, 2017), a capacidade estrutural é a capacidade que as camadas do pavimento têm de resistir aos efeitos deteriorantes produzidos pela repetição das cargas do tráfego.

O conhecimento da capacidade de suporte estrutural de um pavimento, que faz parte de complexos de pátios e pistas aeroportuários, é de grande importância para os operadores de aeródromo, que utilizam este dado para auxiliar a tomada de decisão, tanto em questões de segurança operacional quanto em questão de manutenção e reabilitação das infraestruturas. O

principal indicador da capacidade de suporte utilizado pela população aeroportuária é o Método ACN-PCN (*Aircraft Classification Number/Pavement Classification Number*)

Em 1981, o Método ACN-PCN, foi apresentado pela *International Aviation Civil Organization* - ICAO como forma de padronização internacional de informações aeronáuticas. Este método é aplicável a pavimentos destinados a operações de aeronaves com carga maior ou igual a 5.700 kg. Ele relaciona um número de classificação das aeronaves (ACN) com um número de classificação dos pavimentos (PCN) de forma que quando o PCN for maior ou igual ao ACN as aeronaves podem operar no pavimento sem restrições.

1.1 Problema de Pesquisa

A capacidade de suporte estrutural dos pavimentos aeroportuários, traduzida na forma do PCN, é um dos principais parâmetros utilizados pelos operadores de aeródromos para apoio à tomada de decisão quanto à operacionalidade de determinada aeronave. Além disso, é um bom indicador quanto à condição e vida útil dos pavimentos. Nesse sentido, é imprescindível o monitoramento desse parâmetro a partir de técnicas de avaliação estrutural.

Porém, no Brasil não existe uma regulamentação especificando a frequência da avaliação estrutural dos pavimentos aeroportuários, esse aspecto fica a critério do operador e de sua experiência, o que pode resultar em erros quanto as informações aeronáuticas e até acelerar a deterioração dos pavimentos.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é analisar a capacidade de suporte estrutural de um pavimento aeroportuário pelo Método ACN-PCN, através dos resultados de ensaios de FWD, características do pavimento e tráfego de aeronaves operantes.

Como objetivos específicos, têm-se:

- a) Analisar o tráfego de aeronaves no aeródromo a fim de obter um *mix* representativo;
- b) Separar os ensaios de FWD em segmentos homogêneos;
- c) Tratar estatisticamente os resultados dos ensaios de FWD;
- d) Efetuar a retroanálise do pavimento e das deflexões obtidas em campo, para se obter os Módulos de Resiliência das camadas constituintes da estrutura;
- e) Determinar, com o auxílio do *software* FAARFIELD, a vida útil do pavimento;

- f) Calcular o PCN do pavimento estudado.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, além deste capítulo introdutório, o capítulo 2 é formado pela revisão bibliográfica, apresentando informações e conceitos necessários ao entendimento deste estudo, o Capítulo 3 expõe o método de estudo aplicado na análise da capacidade estrutural do pavimento estudado, o Capítulo 4 mostra os resultados obtidos e sua análise e por último, no capítulo 5, são apresentadas as conclusões obtidas e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo trata da revisão bibliográfica necessária ao entendimento do trabalho apresentado, abordando temas como pavimentos aeroportuários e seus métodos de avaliação.

2.1 Pavimentos Aeroportuários

Para Bernucci *et al.* (2006), os pavimentos são estruturas de múltiplas camadas de espessuras finitas, construídas sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego, de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança. Na opinião de Balbo (2007), o pavimento é uma estrutura composta por camadas sobrepostas de diferentes materiais compactados a partir do subleito, adequada para atender estrutural e operacionalmente ao tráfego, de maneira durável e ao menor custo possível.

No que se refere aos pavimentos aeroportuários, esses são projetados, construídos e mantidos para suportar as cargas críticas impostas pelo tráfego das aeronaves. Estes pavimentos devem ser constituídos de uma superfície estável, regular e resistente à derrapagem. Além disso, a qualidade e a espessura do pavimento devem garantir que ele não falhe quando sob a ação das cargas impostas pelo tráfego e outros agentes deteriorantes (FAA, 2014).

Duran (2015) ressalta que os pavimentos aeroportuários devem possibilitar, com segurança, as manobras de pouso, decolagem, movimento e estacionamento de aeronaves. É no aeródromo que estão os pavimentos aeroportuários, sendo dividido em duas áreas distintas, o Lado Ar e o Lado Terra. O Lado Ar, ou área operacional, é o conjunto formado pela área de movimento de um aeródromo, terrenos e edificações adjacentes, ou partes deles cujo acesso é controlado (ANAC, 2019). O Lado Terra corresponde a área de uso público, onde o acesso não é controlado, tais como áreas de *check-in* e saguões de embarque e desembarque.

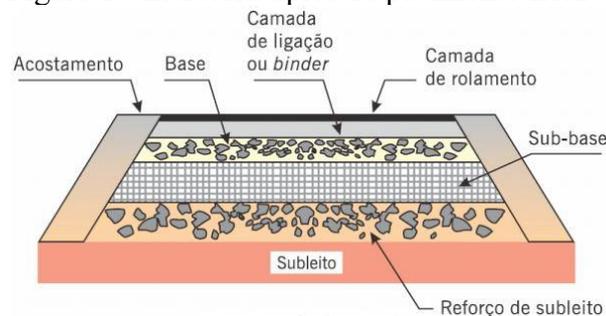
A ANAC (2019) define as diversas áreas pavimentadas de um aeródromo, como:

- a) *Taxiways* (pistas de taxiamento): pavimentos destinados ao taxiamento de aeronaves, para que estas possam acessar as diversas regiões dentro da área operacional, tais como os pátios e pistas de pouso e decolagem;
- b) *Runway* (pista de pouso e decolagem): área preparada, de forma retangular, destinada as operações de pouso e decolagem de aeronaves;
- c) *Aprons* (pátios): áreas preparadas destinadas a acomodação de aeronaves para fins de embarque e desembarque de passageiros, carregamento ou

descarregamento de cargas, correio, reabastecimento de combustível estacionamento ou manutenção.

Segundo a FAA (2014), geralmente os pavimentos aeroportuários se resumem a dois tipos, os pavimentos flexíveis e os rígidos. Essa divisão leva em consideração a sua estrutura, a forma como os esforços são distribuídos e o tipo de revestimento empregado. Para o DNIT (2006), o pavimento flexível é aquele em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa e distribuem os esforços de forma equivalente entre si. Ele, geralmente, é composto por camadas granulares e revestimento asfáltico. Uma esquematização de estrutura de pavimento flexível é mostrada na Figura 1.

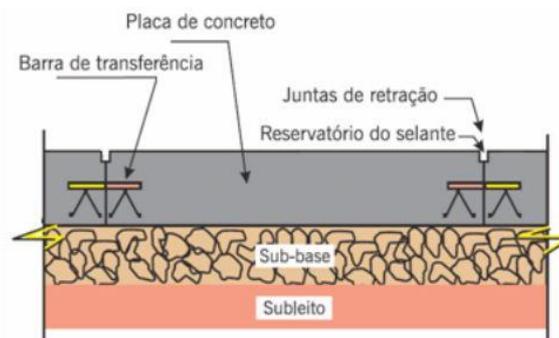
Figura 1 - Estrutura típica de pavimento flexível.



Fonte: Bernucci *et al.* (2006)

Ainda segundo DNIT (2006), os pavimentos rígidos são aqueles em que o revestimento tem elevada rigidez em relação as camadas inferiores. Dessa forma, ele absorve a maior parte dos esforços aplicados, sendo constituído por lajes de concreto de cimento Portland. A Figura 2 apresenta um perfil típico desse tipo de estrutura.

Figura 2 - Estrutura típica de pavimento rígido



Fonte: Bernucci *et al.* (2006)

2.2 Avaliação de Pavimentos Aeroportuários

A ICAO (1983) enumera três critérios essenciais para que um pavimento garanta a segurança das operações: adequada capacidade de suporte, qualidade satisfatória ao rolamento e às características de atrito superficial. Ainda segundo ICAO (1983), o primeiro diz respeito à condição estrutural do pavimento, o segundo a sua forma geométrica e o terceiro à textura da superfície.

2.2.1 Avaliação Funcional

Para Bernucci *et al.* (2006) a avaliação funcional dos pavimentos consiste na apreciação de sua superfície e como esta influência no conforto ao rolamento. O levantamento das condições visuais, é o primeiro passo para a avaliação funcional do pavimento e talvez o mais útil de todos os tipos de levantamento (NIKOLAIDES, 2014).

A ANAC (2017), por meio de seu Manual de Sistema de Gerenciamento de Pavimentos Aeroportuários (SGPA), define a avaliação da condição funcional como uma verificação se o pavimento cumpre duas funções básicas: conforto ao rolamento e segurança. Dessa forma, a avaliação funcional abrange a análise dos seguintes elementos: irregularidade, atrito, macrotextura e defeitos no pavimento.

Segundo Macedo (2005), a avaliação funcional leva em consideração efeitos acumulados de diferentes tipos de defeitos e seus impactos nas diferentes características funcionais. Esta avaliação costuma ser expressa na forma de índices, em aeroportos o mais utilizado é o PCI (*Pavement Condition Index* – Índice de Condição do Pavimento).

O PCI é a classificação da condição da superfície de um pavimento e indica seu desempenho funcional. Determinações periódicas de PCI no mesmo pavimento podem mostrar a alteração no nível de desempenho ao longo do tempo (FAA, 2014). O PCI pode ser entendido como uma classificação numérica da condição do pavimento variando de 0 a 100, sendo 0 a pior condição possível (ruína) e 100 a melhor condição possível (perfeito). De acordo com a ASTM (2012), pode-se subdividir o PCI em 7 categorias, como mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Escala do PCI

PCI	Escala
85 à 100	Excelente
70 à 84	Bom
55 à 69	Regular
40 à 54	Ruim
25 à 39	Muito Ruim
10 à 24	Péssimo
0 à 9	Ruptura

Fonte: ANAC (2017)

A ANAC (2017) define o PCI crítico de manutenção igual a 70, valor a partir do qual do ponto de vista de eficiência orçamentária seria um nível ótimo para execução de uma reabilitação do pavimento. E o PCI crítico de serviço igual a 40, onde o pavimento já possui uma condição ruim, podendo comprometer sua função e aumentar o risco às operações aeroportuárias. A figura 4 expõe como a ANAC delimita os PCI crítico de manutenção e serviço.

Figura 4 - PCI Crítico de Manutenção e de Serviço

	PCI	Escala	Cores
	85 à 100	Excelente	Verde escuro
	70 à 84	Bom	Verde Claro
PCI Crítico de Manutenção (70)	55 à 69	Regular	Amarelo
	40 à 54	Ruim	Laranja
PCI Crítico de Serviço (40)	25 à 39	Muito Ruim	Vermelho
	10 à 24	Péssimo	Vermelho escuro
	0 à 09	Ruptura	Cinza escuro

Fonte: ANAC (2017)

2.2.2 Avaliação Estrutural

A avaliação estrutural consiste na determinação das características físicas dos materiais que compõem a estrutura do pavimento e, então, analisar os efeitos do carregamento sobre a estrutura de forma a obter-se a resposta dessas deformações. Este tipo de análise é realizado utilizando modelos baseados em relações empíricas como o CBR ou ISC (*California Bearing Ratio* – Índice de Suporte Califórnia), que dizem respeito a capacidade de suporte do subleito e da camadas do pavimento, ou métodos mais elaborados como o mecanístico-

empírico, baseados na teoria de camadas elásticas ou teoria de placa delgada para analisar a resposta do pavimento sob a ação de cargas (MACEDO, 2005).

Nos pavimentos aeroportuário, de modo geral, a avaliação estrutural é feita pelos métodos semi-destrutivos e não-destrutivos. Segundo Bernucci *et al.* (2006), os métodos semi-destrutivos são aqueles que se valem aberturas de janelas nos pavimentos. Para Macedo (1996), os métodos não-destrutivos (NDT) provocam menores transtornos ao tráfego que os destrutivos, dando maior flexibilidade para a avaliação quantitativa da condição estrutural do pavimento a qualquer momento da sua vida de serviço, além de possibilitar a reprodução do ensaio no mesmo ponto. Outra vantagem é que os resultados são baseados em medições realizadas na real condição *in situ*, aumentando sua representatividade da real condição estrutural do pavimento.

A FAA (2011) apresenta métodos NDT para avaliação da condição estrutural do pavimento, a saber: FWD (*Falling Weight Deflectometer*), HWD (*Heavy Falling Weight Deflectometer*), GPR (*Ground Penetrating Radar*) e *Infrared Thermography* (Termografia por Infravermelho). A ANAC (2017) aponta dentre os métodos NDT mencionados no parágrafo anterior: FWD (*Falling Weight Deflectometer*) e GPR (*Ground Penetrating Radar*). Além disso, indica os métodos semi-destrutivos de sondagens e DCP (*Dynamic Cone Penetrometer*) para a avaliação dos pavimentos. A seguir são descritos os principais ensaios recomendados pela ANAC e utilizados no Brasil, com ênfase para os ensaios de FWD que serão empregados neste estudo.

2.3 *Falling Weight Deflectometer* – FWD e *Heavy Weight Deflectometer* – HWD

Os HWD e FWD são equipamentos similares, que medem deflexões causadas pela queda livre de uma massa sobre um conjunto amortecedor para a produção de uma carga de impulso. A principal diferença entre os dois reside na magnitude da carga aplicada no ensaio: enquanto os equipamentos de FWD aplicam cargas da magnitude de 7 a 240 kN, os HWD podem imprimir cargas ajustáveis de 30 a pouco mais de 300 kN (ANAC, 2019).

Para a FAA (2011), os FWD e HWD conseguem simular as cargas das rodas em movimento, ter uma velocidade relativamente rápida de execução e requer apenas a aplicação de uma pequena pré-carga na superfície do pavimento.

Segundo ANAC (2019), os FWD e HWD são os principais equipamentos disponíveis para a realização de ensaios não destrutivos, com a finalidade de determinar o PCN (*Pavement Classification Number*) de pavimentos aeroportuários. Visando esse objetivo é

necessário que seja feita uma análise de compatibilidade de carga aplicada ao pavimento por aeronaves e a carga a ser utilizada pelo equipamento no ensaio.

Para o DNIT (2006), os FWD são equipamentos que aplicam cargas impulsivas, de tal duração que é capaz de simular cargas de roda a velocidades da ordem de 70 km/h e ainda podem ser aplicadas cargas equivalentes às dos eixos de caminhões ou dos trens-de-pouso de aeronaves. Estes equipamentos medem as bacias de deflexão ou deformação, que são medidas dos deslocamentos elásticos, causados pela queda de um peso simulando a passagem de uma roda no ponto ensaiado, a partir do ponto de carregamento.

O DNIT (1996), descreve o método e os passos a serem seguidos para a execução de ensaios com aparelhos de FWD:

A determinação das deflexões é realizada por um deflectômetro de impacto projetado para simular o efeito de cargas de roda em movimento. Isto é obtido pela queda de um conjunto de massas, a partir de alturas pré-fixadas, sobre um sistema de amortecedores de borracha que transmitem a força aplicada a uma laca circular apoiada no pavimento. Os deslocamentos recuperáveis gerados na superfície do pavimento (bacia de deflexões) são medidos por sensor instalados ao longo de uma barra metálica.

Na Figura 5 é mostrado, de forma geral, um reboque com FWD, e na Figura 6 são apresentados detalhes do sistema de carregamento, da placa e sensores.

Figura 5 - FWD sobre reboque para realização de ensaio



Fonte: Dynatest (2019)

Figura 6 - Detalhe dos sensores e pesos batentes do FWD



Fonte: Adaptado de Bernucci *et al.* (2006)

Os ensaios com equipamentos de FWD/HWD geram resultados na forma de valores de deflexão elástica do pavimento ensaiado (bacias de deflexão), tendo geralmente um *output* em planilhas como mostrado na Figura 7.

Figura 7 - Exemplo de planilha de resultados de FWD

Condição Deflectométrica - Dc											
RODOVIA:	BR xxx/XX	INICIAL:	0,400	PISTA:	Dupla	OPERADOR:	xxxxxxxx xxxxxxxx	SENTIDO:	Crescente		
DATA:	17/06/2015	FINAL:	3,800	FAIXA:	2	EQUIPAMENTO:	Falling Weight Deflectometer	RAIO DE APLICAÇÃO:	15 cm		
Posição (km)	Força (kgf)	Temperatura (°C)		Valores de Deflexão (0,01mm)							Observação
		Ar	Pav	D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120	
0,400	4.262	29	33	45,1	33,6	27,2	19,7	13,0	8,6	6,1	
0,600	4.312	29	33	26,5	17,7	13,7	9,8	5,0	2,3	1,0	Término 3ª Faixa
0,800	4.326	29	33	32,7	23,0	17,5	12,3	6,7	5,3	3,8	
1,000	4.326	29	33	52,9	28,9	23,5	15,7	9,8	5,6	3,6	km 1
1,200	4.340	29	34	21,1	16,2	12,9	9,7	6,1	4,5	3,4	
1,400	4.354	29	34	28,5	19,5	14,6	11,2	6,8	4,7	3,6	
1,600	4.298	29	36	37,2	26,7	20,3	14,2	7,8	4,2	2,6	
1,800	4.298	29	36	27,0	20,9	17,0	12,7	7,9	5,2	3,2	
2,000	4.284	29	37	25,1	18,8	16,6	12,1	8,9	5,6	3,5	km 2
2,200	4.298	29	36	31,4	24,2	18,9	13,0	8,6	5,6	3,3	OAE
2,400	4.284	29	37	24,2	17,1	15,1	10,3	7,3	6,0	5,0	
2,600	4.262	29	38	25,2	17,8	13,9	10,5	7,2	4,7	4,0	
2,800	4.255	30	37	21,2	15,6	12,9	8,8	6,3	4,2	3,4	
3,000	4.262	30	36	55,6	33,5	26,4	18,5	12,0	8,7	6,8	km 3
3,200	4.354	30	36	21,4	17,3	15,0	12,6	9,5	7,0	4,8	
3,400	4.241	30	36	17,4	14,4	11,8	10,1	7,0	5,3	3,6	
3,600	4.277	30	36	4,8	3,6	3,2	3,1	2,8	2,5	2,4	
3,800	4.185	30	36	38,1	26,0	18,6	12,4	7,2	5,5	3,4	
4,000	4.269	30	35	54,2	32,1	24,0	14,4	8,4	5,1	3,7	km 4
4,200	4.319	30	36	38,9	29,3	21,5	16,2	9,6	6,1	4,1	

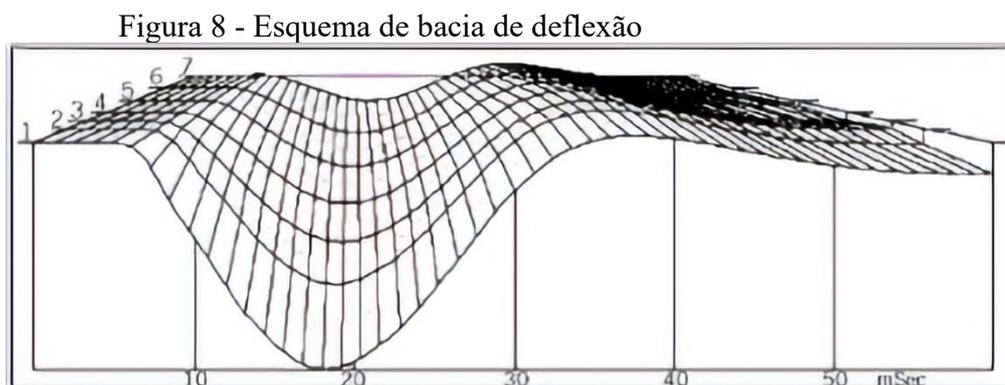
Fonte: ANTT (2019)

Na planilha apresentada na Figura 7, pode-se destacar como principais dados obtidos no ensaio os valores de deflexão medidos por cada um dos 7 sensores, representados pelas colunas Df0 (sensor no ponto de aplicação da carga), Df20 (sensor a 20 cm do ponto de aplicação da carga), ..., Df120 (sensor à 120 cm do ponto de aplicação da carga), formando as

bacias de deflexões, o ponto e a força aplicada para cada repetição do ensaio no trecho.

Os dados das medidas deflectométricas fornecem a bacia de deflexão que são usadas em procedimentos de retroanálise para determinação dos valores de módulo elástico das várias camadas que compõem o pavimento em estudo, gerando um banco de dados que traduz o nível de degradação estrutural do pavimento (MORAES, 2015).

As bacias de deflexão podem ser entendidas como a curva representativa das medidas de deflexão elástica, causadas pela passagem de um eixo ou trem-de-pouso sobre o ponto de aplicação medido. Na Figura 8 é mostrado um gráfico de três dimensões esquemático de uma bacia de deflexão. No eixo vertical são plotados os valores das deflexões de cada sensor, no eixo horizontal, o tempo de aplicação das cargas e no terceiro eixo os números de 1 a 7 são representações dos sensores do FWD.



Fonte: Bernucci *et al.* (2006)

2.4 Ground Penetrating Radar – GPR

O *Ground Penetrating Radar* (GPR) é um método geofísico de prospecção que emprega ondas eletromagnéticas com altas frequências, que correspondem às ondas de rádio no espectro eletromagnético (LOPES, 2009).

O GPR pode ser apontado como um instrumento promissor tanto para obtenção de parâmetros que deem suporte a avaliação estrutural pontual como também usados periodicamente para conhecer a variação de 2 condições e o histórico de um pavimento. Aplicando esse método não destrutivo, através da identificação das camadas que compõe o pavimento, é possível conhecer um pouco da sua evolução, por exemplo, em termos de lençol freático e umidade de equilíbrio, efeitos de trincamento progressivo na superfície, eventuais deformações permanentes excessivas em profundidade, etc. Aspectos como substituição de solo, escavações, espessura de camadas entre outros são possíveis de serem identificados com o emprego do GPR (LOPES, 2009).

A técnica do GPR, segundo Lopes (2009).

Está fundamentada no fenômeno de propagação de ondas eletromagnéticas, regidas segundo as equações de Maxwell aplicadas a meios eletromagnéticos que descrevem a indução eletromagnética ocasionada por um campo elétrico no vácuo. Envolve uma série de parâmetros inerentes aos meios nos quais se dá a propagação: as propriedades magnéticas (permeabilidade magnética) e as propriedades elétricas do meio estudado (condutividade ou resistividade e constante dielétrica ou permissividade dielétrica).

Para Aguiar (2005), um equipamento de GPR básico consta de controle central, um conjunto de antenas ligados a ele e um sistema de gravação de dados. A unidade de controle funciona com um programa implementado que controla a emissão, recepção e o registro da energia.

Segundo ANAC (2017), o *Ground Penetration Radar* (GPR) é utilizado para avaliar a estratigrafia e detectar possíveis anomalias estruturais das camadas do pavimento. Um exemplo de aparelho de GPR é mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Carrinho com GPR acoplado para operação manual



Fonte: Lopes (2009)

2.5 Sondagens e *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP)

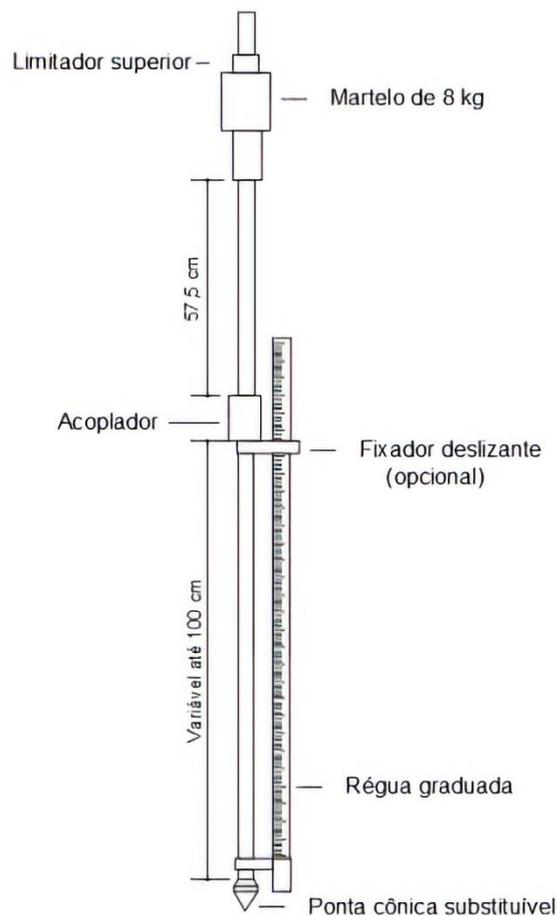
Para ANAC (2017), as sondagens para extração de corpos de prova são utilizadas para identificação, caracterização e medição das espessuras das camadas do pavimento. Geralmente, são extraídos corpos de prova cilíndricos e encaminhados para realização de ensaios em laboratório. A ANAC (2017) recomenda realizar no mínimo os seguintes ensaios:

ensaio de granulometria, limites de liquidez e plasticidade, resistência a compressão e ensaio Marshall.

O ensaio de DCP consiste na medição da taxa de penetração do penetrômetro de cone dinâmico com um martelo (geralmente de 8 kg) através do solo e/ou materiais compactados. A taxa de penetração está relacionada com o CBR/ISC estimado *in situ* (ASTM, 2003). A ASTM (2003) descreve como DCP típico um martelo de 8kg que cai a uma altura de 575 mm, gerando uma energia teórica de 45J ou 14,3J/cm² e crava uma ponta de cone com 60° e base de 20 mm de diâmetro na camada de pavimento ou subleito.

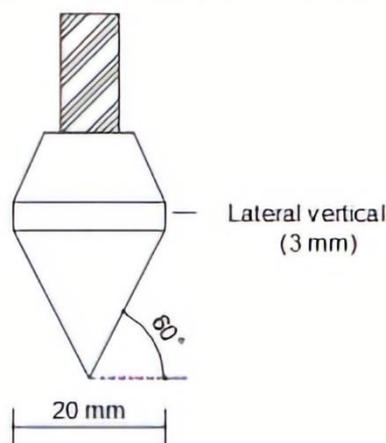
Segundo a ANAC (2017), o DCP é utilizado para determinar o CBR *in situ* do pavimento. Nas Figuras 10 e 11 são apresentados os componentes de um DCP padrão.

Figura 10 - Principais componentes de um DCP



Fonte: Torres (2017)

Figura 11 - Ponta cônica do DCP padrão



Fonte: Torres (2017)

2.6 Capacidade Estrutural de Pavimentos Aeroportuários – Método ACN/PCN

Na opinião de Durán (2015), um pavimento aeroportuário deve possuir a capacidade de suporte necessária para resistir às cargas impostas pelo tráfego aéreo. Portanto, definir o tipo de aeronaves que pode operar sobre um determinado pavimento é fundamental para avaliar o efeito das tráfego sobre ele.

Uma das formas mais utilizadas para mensurar essa capacidade é por meio do Método ACN-PCN (*Aircraft Classification Number* – ACN e *Pavement Classification Number* - PCN). Este método foi apresentado pela ICAO (*International Civil Aviation Organization*), em 1981, como uma forma de padronização internacional de informações aeronáuticas.

Segundo ANAC (2016), o Método ACN-PCN é aplicável em pavimentos destinados a pouso e decolagem de aeronaves de mais de 5.700 kg. Para aeronaves com carga inferior a 5.700 kg a resistência dos pavimentos deve ser definida por meio da carga máxima admissível das aeronaves e da pressão máxima de pneus admitida pelo pavimento.

O ACN pode ser entendido como o número que expressa o efeito relativo que uma aeronave provoca sobre um pavimento ao operar sobre ele, enquanto o PCN é a capacidade de suporte estrutural apresentada pelo pavimento. O Método ACN-PCN correlaciona esses dois números de forma que para uma aeronave operar sem restrição, seu ACN deve ser menor ou igual ao PCN expresso, caso contrário o pavimento poderá sofrer avarias ou danos estruturais (ANAC, 2016).

Ainda de acordo com ANAC (2016), o ACN varia com o peso e a configuração da aeronave (tipo de trem-de-pouso, pressão de pneu, entre outros), o tipo de pavimento e a

resistência do subleito, sendo informado pelos fabricantes de aeronaves. Ainda sob instrução de ANAC (2016), para pavimentos flexíveis o ACN deve ser obtido utilizando o método CBR ou ISC.

Por sua vez, o PCN de um pavimento aeroportuário é indicado na forma de um código composto por cinco elementos listados e descritos a seguir:

- a) Valor numérico do PCN: existem duas formas de se encontrar o valor numérico do PCN, são elas o método de avaliação técnica, representado pelo código “T”, e o método de avaliação experimental, representado pelo código “U”. Segundo Oliveira (2016), o método de avaliação experimental é de fácil aplicação, tendo em vista que este não necessita de conhecimentos detalhados sobre a estrutura do pavimento, adotando como PCN o maior dentre os ACN das aeronaves que operam regularmente no aeródromo. Com relação ao método de avaliação técnica são levados em consideração fatores como frequência de operações e níveis de tensão admissíveis, obtendo-se a carga bruta da aeronave pelo processo inverso do dimensionamento. Uma vez obtida a carga admissível, a determinação do valor do PCN torna-se um processo de obtenção do ACN da aeronave que representa a carga admissível, tomando-se esse valor como o PCN do pavimento (ANAC, 2016).
- b) Tipo de pavimento: segundo ANAC (2016), podem ser adotados dois diferentes tipos de pavimentos, os flexíveis, representados pelo código “F”, e os rígidos, representados pelo código “R”. Deve-se escolher o código adequado ao tipo de revestimento do pavimento estudado.
- c) Resistência do subleito: os valores de resistência normalizados são valores que compreendem e representam os demais valores da categoria. Logo ao se identificar a categoria, o valor de resistência a ser utilizado deve ser o normalizado em vez do real. Os valores de resistência do subleito para pavimentos rígidos e seus respectivos códigos são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1-Resistência do subleito para pavimentos rígidos

Categoria do subleito	Resistência do subleito k (MN/m³)	Resistência do subleito normalizada k (MN/m³)	Código
Alta	$K \geq 120$	150	A
Média	$60 < k < 120$	80	B
Baixa	$25 < k \leq 60$	40	C
Ultrabaixa	$k \leq 25$	20	D

Fonte: ANAC (2016)

Os valores da resistência do subleito para pavimentos flexíveis e seus códigos de referência são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2-Resistência do subleito para pavimentos flexíveis

Categoria do subleito	Resistência do subleito CBR	Resistência do subleito normalizada CBR	Código
Alta	$CBR \geq 13$	15	A
Média	$8 < CBR < 13$	10	B
Baixa	$4 < CBR \leq 8$	6	C
Ultrabaixa	$CBR \leq 4$	3	D

Fonte: ANAC (2016)

- d) Pressão de pneus: a pressão de pneus exercida pelos trens-de-pouso para pavimentos rígidos é considerada sempre como ilimitada, código “W”. Para pavimentos flexíveis ou mistos é apresentada a Tabela 3 com os limites de pressão de pneus e seus respectivos códigos.

Tabela 3-Pressão de pneus máxima permitida para pavimentos flexíveis ou mistos

Categoria	Código	Pressão máxima permitida nos pneus (MPa)
Ilimitada	W	Sem limite de pressão
Alta	X	Pressão limitada a 1,75 Mpa
Média	Y	Pressão limitada a 1,25 Mpa
Baixa	Z	Pressão limitada a 0,5 Mpa

Fonte: ANAC (2016)

Como exemplo, o Aeroporto Internacional Tom Jobim – Galeão possui duas pistas de pouso e decolagem com cabeceiras nomeadas 10/28 e 15/33. De acordo com RIOGALEÃO (2018), a pista 10/28 tem um PCN declarado de PCN 78/R/A/W/T, PCN 78 indica a resistência do pavimento, R indica que o pavimento é rígido, A significa que o subleito tem uma alta resistência, W indica que não existe limite para a pressão de pneus das aeronaves e T mostra que foi utilizado o método de avaliação técnico para determinação do PCN.

Uma limitação do Método ACN-PCN é que ele se destina apenas a auxiliar os operadores de aeródromo na tomada de decisão quanto à operação de aeronaves em seus pavimentos, ele não deve ser utilizado para finalidades de projetos de aeródromos (FAA, 2014). De acordo com Fabre (2018), o Método ACN-PCN possui inconsistências com relação aos métodos de dimensionamento de pavimentos aeroportuários atuais. Ele é baseado na classificação CBR, sendo um método empírico que não considera a resposta mecânica real do

pavimento, considera configurações de rodas simples para os trens de pouso e equivalências para os materiais do pavimento. Enquanto, os métodos de projeto de pavimentos atuais são baseados em análise elástica linear, sendo métodos mecanicista-empíricos que consideram a resposta mecânica do pavimento (tensão-deformação) às cargas das aeronaves, todas as rodas dos trens de pouso são consideradas e as características dos materiais são respeitadas.

Ainda segundo Fabre (2018), para resolver essas inconsistências a ICAO pretende substituir o Método ACN-PCN pelo Método ACR-PCR (*Aircraft Classification Rating – Pavement Classification Rating*), onde em 2020 o Método ACR-PCR se tornará oficialmente o novo sistema de classificação da ICAO e, até 2024, os fabricantes de aeronaves e operadores de aeródromos devem adequar-se ao novo sistema.

3 MÉTODO DE PESQUISA

Este capítulo destina-se a apresentar as etapas desenvolvidas na análise dos dados para a realização deste trabalho. Destacam-se a área de estudo, o tratamento dos dados oriundos dos ensaios de *Falling Weight Deflectometer* (FWD), o tráfego de aeronaves do aeródromo estudado e a filtragem desses dados para execução das análises, a retroanálise das bacias deflectométricas utilizando o *software* BAKFAA, a estimativa da vida útil do pavimento usando o *software* FAARFIELD e, finalmente, a determinação do *Pavement Classification Number* (PCN) da *Taxiway* alvo deste estudo com o auxílio do *software* COMFAA. A Figura 12 apresenta a estrutura lógica definida para o estudo realizado neste trabalho.

Figura 12 - Estrutura e organização dos resultados



Fonte: o Autor

3.1 Determinação da área de estudo

Para a realização deste trabalho foi escolhida uma *taxiway*, denominada de *Taxiway* M, de acesso ao pátio de aeronaves comerciais de um aeroporto brasileiro, doravante denominado TCC Airport, também para manter sua identidade em sigilo. Segundo dados cedidos pela INFRAERO, entre 2013 e 2017 ocorreram, em média, cerca de 60.000 operações (pousos e decolagens) por ano neste aeródromo; destas, aproximadamente 80% passam pela *Taxiway* M. O pátio de aeronaves que a *Taxiway* M atende destina-se a aeronaves das categorias C, D e E.

Foram fornecidos, pelo operador do aeródromo, resultados de ensaios de FWD executados em 3 trechos e obtidos no eixo e em *offset's* de 6 metros do eixo da *Taxiway* M para a esquerda e para a direita. Os ensaios foram realizados com o auxílio do reboque Dynatest, se prolongaram por 240 metros no eixo e a 6 metros dele. A carga aplicada foi de 100 kN e os 7 geofones foram posicionados no ponto de aplicação do carregamento e a distâncias de 20, 30, 45, 60, 90 e 120 centímetros dele, nomeados respectivamente de Df₁, Df₂, Df₃, Df₄, Df₅, Df₆ e Df₇.

Utilizando os resultados dos ensaios de FWD e um *mix* de aeronaves representativo do aeródromo foi possível determinar a vida útil e o PCN, parâmetros determinantes para a avaliação da condição estrutural do pavimento da *Taxiway M*.

3.2 Determinação dos segmentos homogêneos e análise estatística das deflexões recuperáveis

Os levantamentos deflectométricos, resultantes dos ensaios de FWD na *taxiway M*, foram utilizados para a determinação de trechos nos quais o pavimento apresenta características homogêneas quanto à sua condição estrutural, denominados de segmentos homogêneos. Para a sua determinação seguiu-se as recomendações de Bernucci *et al.* (2006), fazendo uso do método das diferenças acumuladas, procedimento indicado pela AASHTO (1993).

O método das diferenças acumuladas foi calculado pela seguinte sequência de passos:

- a) Calculou-se a média dos valores de deflexão para todo o trecho ensaiado ($Df_{1\text{médio}}$);
- b) Calculou-se a diferença entre cada valor individual de deflexão e a média;
- c) Calcularam-se os valores das diferenças acumuladas;
- d) Desenhou-se um gráfico no qual o eixo das abscissas estão as distâncias e no eixo das ordenadas os valores das diferenças acumuladas.

Para esta análise foram utilizados os valores de Df_1 , deflexão medida no ponto de aplicação do carregamento, de cada um dos trechos ensaiados. O princípio desse método reside na análise do gráfico resultante da sequência apresentada, a cada mudança de sinal da inclinação do gráfico foi determinado um trecho de segmento homogêneo (SH).

Segundo DNIT (2006), cada mudança na inclinação da curva obtida demonstra uma mudança no comportamento médio de um determinado segmento para outro, isso caracteriza matematicamente as extremidades dos SH. Após a determinação dos SH procedeu-se a análise estatística das deflexões recuperáveis, seguindo recomendações de DNER (1979), para cada um deles. Esta análise consistiu no cálculo da deflexão média, desvio padrão e deflexão característica dos resultados do ensaio FWD em cada um dos SH. Para esta análise, adotou-se o seguinte:

- a) Calculou-se as médias aritméticas ($Df_{1\text{média}}$, $Df_{2\text{média}}$, $Df_{3\text{média}}$, $Df_{4\text{média}}$, $Df_{5\text{média}}$, $Df_{6\text{média}}$ e $Df_{7\text{média}}$) e o desvio padrão (σ) das deflexões recuperáveis obtidas nos

ensaios de FWD ($Df_1, Df_2, Df_3, Df_4, Df_5, Df_6$ e Df_7), em cada um dos segmentos homogêneos;

- b) Estabeleceram-se intervalos de aceitação para os valores individuais das deflexões, definidos pelos limites $Df_{\text{média}} \pm z\sigma$. z é estimado em função do número de amostras e apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetro z em relação ao número de amostras

<i>Número de amostras</i>	<i>z</i>
3	1
4	1,5
5 - 6	2
7 - 19	2,5
≥ 20	3

Fonte: DNER (1979)

- c) Após estabelecimento dos limites, seguiu-se a eliminação dos valores de deflexão que não lhes obedeciam. Procedendo-se novamente os cálculos das médias, dos desvios padrão e limites sem os valores excedentes. Este procedimento foi realizado tantas vezes quanto necessário até não haver mais valores fora dos limites calculados;
- d) O valor das deflexões características (Df_c) foi determinado para cada um dos segmentos homogêneos e suas medidas de deflexão através da expressão, $Df_c = Df_{\text{média}} + \sigma$.

Para efeito de aplicação na retroanálise foram calculados $Df_i = Df_{\text{média}} \pm \sigma$.

3.3 Tráfego de aeronaves

Para a determinação de um *mix* de aeronaves representativo para a *Taxiway M* e a realização das análises, foram utilizados os dados das operações, dos anos de 2013 até 2017 fornecidos pela INFRAERO, não foi possível obter os dados de tráfego referentes aos anos de 2018 e 2019. Os dados de 2013 a 2017 foram separados de forma a apresentar a quantidade de operações (pousos e decolagens) por aeronave no aeródromo em estudo.

Vale ressaltar que foram excluídos helicópteros e aeronaves com menos de 5700 kg, pois estas não se encaixam no Método ACN/PCN. Foram, ainda, filtradas as aeronaves com 2% ou mais do total de operações, em cada ano, aeronaves de mesmo modelo foram juntas em apenas um dado componente do *mix*. Além da seleção das aeronaves para o *mix* foi feita uma média do total de operações no aeródromo dos anos de 2013 a 2017, que resultou em 60.548 operações, sendo divididas, igualmente, entre pousos e decolagens.

3.4 Retroanálise do pavimento

A retroanálise consistiu na obtenção dos módulos de elasticidade das camadas do pavimento, que conduziram às deformações apresentadas nos ensaios de deflexão. Para os cálculos necessários, foi utilizado o programa BAKFAA versão 2.1.0.1, disponibilizado gratuitamente pela FAA. O *software* ajustou as espessuras e módulos de elasticidades para que as deformações calculadas se aproximassem o máximo possível das captadas nos ensaios. Assim, obteve-se uma correspondência entre as deformações e as características mecânicas das camadas do pavimento (Módulo de Resiliência - M_r).

Como dados de entrada nesta etapa do trabalho, foram utilizadas as informações sobre as espessura e composição das camadas do pavimento, repassadas pelo operador do aeródromo estudado, módulos de resiliências iniciais, informados por Ribeiro (2016), e dois conjuntos de valores de deflexões para cada segmento homogêneo ($D_{fi} = D_{fimédia} \pm \sigma$).

As camadas do pavimento da *Taxiway M* são compostas por CAUQ (Concreto Asfáltico Usinado a Quente) em sua capa de rolamento, BGS (Brita Graduada Simples) na base e um subleito composto por um solo areno siltoso avermelhado. A Figura 13 apresenta uma esquematização do perfil e valores utilizados de Módulo de Resiliência.

Figura 13 - Perfil do pavimento estudado e valores iniciais de M_r

CAUQ		23 cm, $M_r = 3000$ Mpa
BGS		33 cm, $M_r = 400$ Mpa
SUBLEITO		50 cm, $M_r = 300$ Mpa

Fonte: O Autor

Por fim, foi calculada a média dos resultados de Módulo de Resiliência para cada um dos SH que foram utilizadas como dados de entrada nas etapas seguintes.

3.5 Estimativa da vida útil do pavimento

Para a determinação da vida útil do pavimento em estudo foi utilizado o *software* FAARFIELD versão 1.42, disponibilizado pela FAA para o planejamento e dimensionamento de pavimentos aeroportuários. Como uma de suas funcionalidades, o *software* tem a determinação da vida útil.

Como dados de entrada, o FAARFIELD requer informações sobre o *mix* de aeronaves, espessura, tipo e Módulo de Resiliência das camadas do pavimento e, ainda, um horizonte de projeto. Após o fornecimento dessas informações ao programa, ele retorna o CDF (*Cumulative Damage Factor*), a vida útil remanescente do pavimento, além de outros fatores.

O FAARFIELD, inicialmente, tem uma biblioteca própria de tipos de camadas e materiais com características próprias, não permitindo que sejam utilizados os Módulos de Resiliência calculados nas etapas anteriores. Como resolução a essa restrição optou-se por utilizar camadas nomeadas pelo *software* de *User Defined*, no qual o próprio usuário do programa pode definir as características das camadas.

Na configuração do *software* para determinação da vida útil, utilizou-se do *mix* selecionado para os anos de 2013 a 2017, alterando nas configurações de cada aeronave as *Annual Departures* (partida anuais) pelas decolagens obtidas no *mix* selecionado, as espessuras apresentadas e fornecidas para o pavimento pelo operador do aeródromo, o módulo de resiliência encontrado para os materiais na etapa de retroanálise e um horizonte de projeto de 20 anos, este último apenas para padronização e modelagem por parte do *software*.

Na introdução do *mix* de aeronaves no FAARFIELD, notaram-se que algumas não estavam pré-configuradas no *software*. Para contornar isso, optou-se pela utilização de aeronaves com configurações de trem de pouso semelhantes e delas alterar o *Gross Taxi Weight* (peso bruto de taxiamento) para o da aeronave que se queria simular.

3.6 Determinação do PCN

No cálculo numérico do PCN utilizou-se o *software* COMFAA versão 3.0, disponibilizado gratuitamente pela FAA. Esse avalia as espessuras mínimas do pavimento requeridas por cada aeronave do *mix* e então calcula o valor do PCN. Os outros parâmetros são ponderados de acordo com o pavimento em análise e o tipo de estudo realizado.

Para a determinação do valor numérico do PCN, o COMFAA foi configurado de forma a adicionar em sua biblioteca as aeronaves constituintes do *mix*, selecionado em etapa

anterior, alterando apenas suas *Annual Departures* (partidas anuais) para as decolagens obtidas no *mix* selecionado. As camadas do pavimento foram inseridas como *Plant Mix Bituminous Pavements* para a capa de rolamento de CAUQ, *Crushed Aggregate Base Course* para a base de BGS e para o subleito foi utilizado um CBR igual a 15 % visto que, na retroanálise o MR do subleito apresentou valores entre 300 e 400 Mpa, na etapa de determinação da vida útil o FAARFIELD correlacionou o CBR do subleito para aproximadamente 10% desses valores, ficando entre 30 e 40 %, e que no Método ACN-PCN para subleitos com CBR acima de 13 % deve-se utilizar o valor normalizado de 15 %.

A exemplo do FAARFIELD, houve problemas quanto a aeronaves que não estavam pré-configuradas no *software*. A solução encontrada para contornar isto foi a mesma do programa anterior, a utilização de aeronaves com configurações de trem de pouso semelhantes e delas alterar o *Gross Taxi Weight* (peso bruto de taxiamento) para o da aeronave que se queria simular.

4 ANÁLISES E DISCUSSÕES

Neste capítulo apresentam-se os resultados das análises feitas sobre os dados fornecidos do ensaio de FWD e dos softwares BAKFAA 2.1.0.1, FAARFIELD 1.42 e COMFAA 3.0, utilizados para a determinação dos módulos de resiliência, vida útil e PCN do pavimento respectivamente.

4.1 Determinação do mix de aeronaves

Após a filtragem das aeronaves que se encaixam no Método ACN-PCN e das que apresentaram 2% ou mais das operações anuais entre os anos 2013 e 2017, a tabela 5 mostra as aeronaves selecionadas nessa análise preliminar.

Tabela 5 - Aeronaves com 2% ou mais de operações nos anos de 2013 a 2017

Aeronaves	% de operações no ano				
	2013	2014	2015	2016	2017
A318-122	5,37	4,18	3,49	3,25	2,68
A320-214	17,13	15,99	15,78	15,05	12,54
A320-232	6,07	4,97	3,96	2,55	2,68
A321-231	5,99	9,65	13,97	16,16	15,22
737-8EH	15,77	20,56	22,33	20,63	21
ERJ 190-100-IGW	2,25	0	0	0	0
ERJ 190-200 IGW	7,23	7,01	7,13	7,87	3,91
ATR-72-212A	0	0	3,55	4,25	2,68
A320-251N	0	0	0	0	7,88
ERJ 190-200 LR	0	0	0	0	3,26

Fonte: o Autor

Para cada ano foi selecionado um *mix* obedecendo os critérios mencionados no parágrafo anterior, eles serão utilizados apenas para a determinação do PCN ao longo dos anos, e o *mix* médio será, também, utilizado para a determinação da vida útil. O Apêndice A apresenta uma tabela com os *mix* filtrados para cada um dos anos desta análise.

Analisando a Tabelas 5 nota-se que algumas aeronaves, com o passar do tempo tiveram uma grande diminuição nas suas operações ou, simplesmente pararam de operar no aeródromo, como são os casos do EMB-810 C e do ERJ 190-100-IGW, essas aeronaves foram excluídas do *mix* utilizado neste estudo. Observa-se ainda que outras iniciaram suas operações após o ano de 2013; exemplos disso são o ATR-72-212A, que tem seu primeiro registro relevante em 2015, e o A320-251N e o ERJ 190-200 LR, que começaram apenas em 2017.

Após o ajuste nos *mix*, foi feito o *mix* médio utilizando a média das porcentagens de operações dos anos analisados. Para as aeronaves que aparecem após 2013, a média foi feita apenas pelo número de anos que elas apresentam registros significativos. A Tabela 6 mostra as aeronaves restantes após os ajustes.

Tabela 6 - Porcentagem média das operações das aeronaves nos 5 anos analisados

Aeronaves	% média de operações
A318-122	3,79
A320-214	15,30
A320-232	4,05
A321-231	12,20
737-8EH	20,06
ERJ 190-200 IGW	6,63
ATR-72-212A	3,49
A320-251N	7,88
ERJ 190-200 LR	3,26
TOTAL	76,66

Fonte: o Autor

Nota-se que as aeronaves apresentadas na Tabela 6 representam uma média de 76,66% das operações. Para a utilização desse *mix* neste estudo, foi feita uma média ponderada, dividindo a porcentagem média pelo total das médias de operações e multiplicando por 100. Assim, esse *mix* passou a representar 100% das operações do aeródromo. Além disso, percebem-se que alguns modelos de aeronaves se repetem em suas variações comerciais, como é o caso do A320-232 e do A320-214. Elas foram agrupadas em apenas uma aeronave para a modelagem e suas porcentagens de operações somadas. A Tabela 7 apresenta o *mix* de aeronaves final e utilizado neste trabalho.

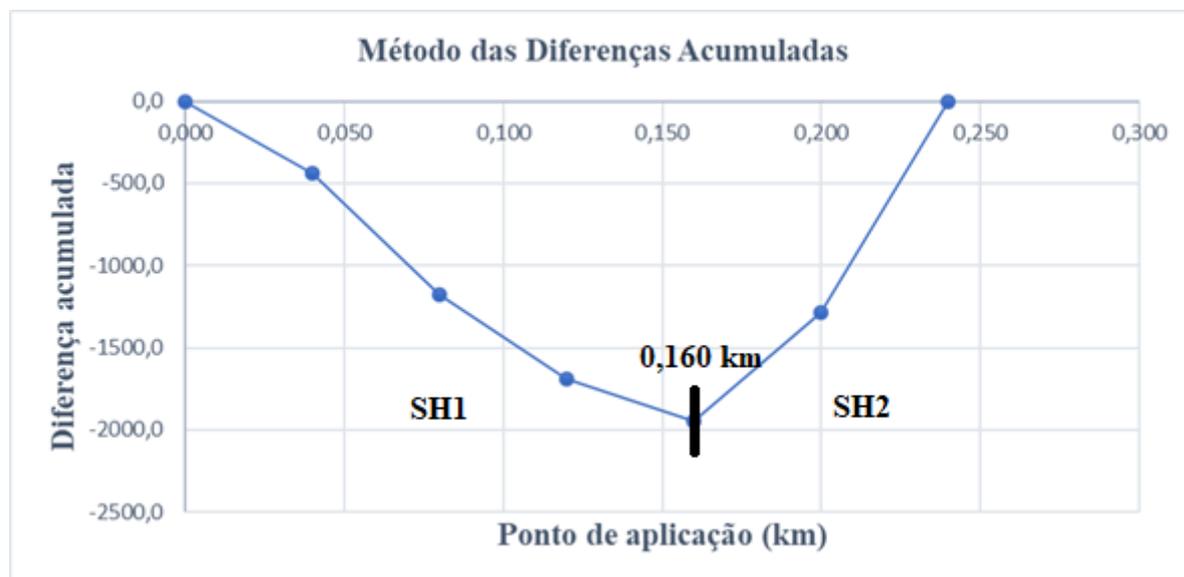
Tabela 7 - Mix de aeronaves utilizado no estudo

Aeronaves	Pouso	Decolagem	% de operações
A318-100	1499	1498	4,95
A320-200	10751	10749	35,51
A321-231	4817	4816	15,91
737-8EH	7924	7922	26,17
ERJ 190-200 IGW	2619	2618	8,65
ATR-72-212A	1381	1380	4,56
ERJ 190-200 LR	1287	1287	4,25
TOTAL	30.277	30.271	100

Fonte: o Autor

4.2 Determinação dos segmentos homogêneos e análise estatística das deflexões recuperáveis

No gráfico 1 são apresentados os Segmentos Homogêneos determinados no eixo da *Taxiway M*, após a análise realizada pelo método das diferenças acumuladas, como descrito no capítulo anterior.

Gráfico 1- Diferença acumulada *versus* Ponto de aplicação – Eixo da *Taxiway M*

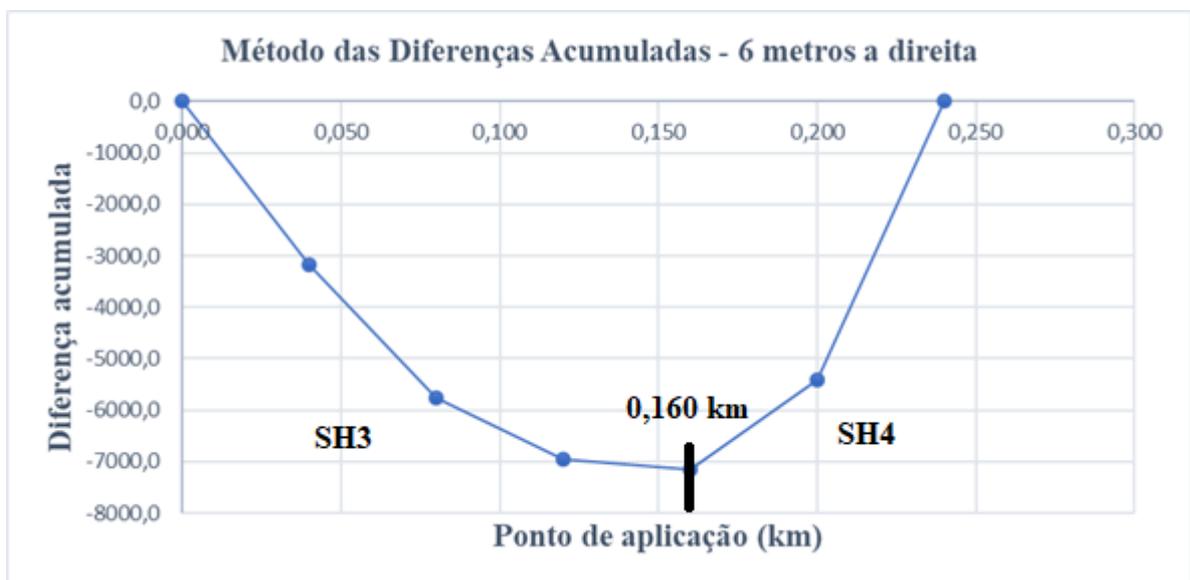
Fonte: o Autor

Para o eixo notou-se que o gráfico gerado pelo método das diferenças acumuladas (MDA), muda a direção do sinal no ponto correspondente a 160 metros do início do ensaio. Essa mudança de direção indica que o pavimento responde de forma matematicamente

semelhante a aplicação de cargas do ensaio de FWD, desde o ponto correspondente a 0 metros do início até 160 metros, doravante denominado de segmento homogêneo 1 (SH1), e que de 160 metros até os 240 metros, segmento homogêneo 2 (SH2), quando é finalizado o ensaio de FWD, o pavimento responde de forma diferente.

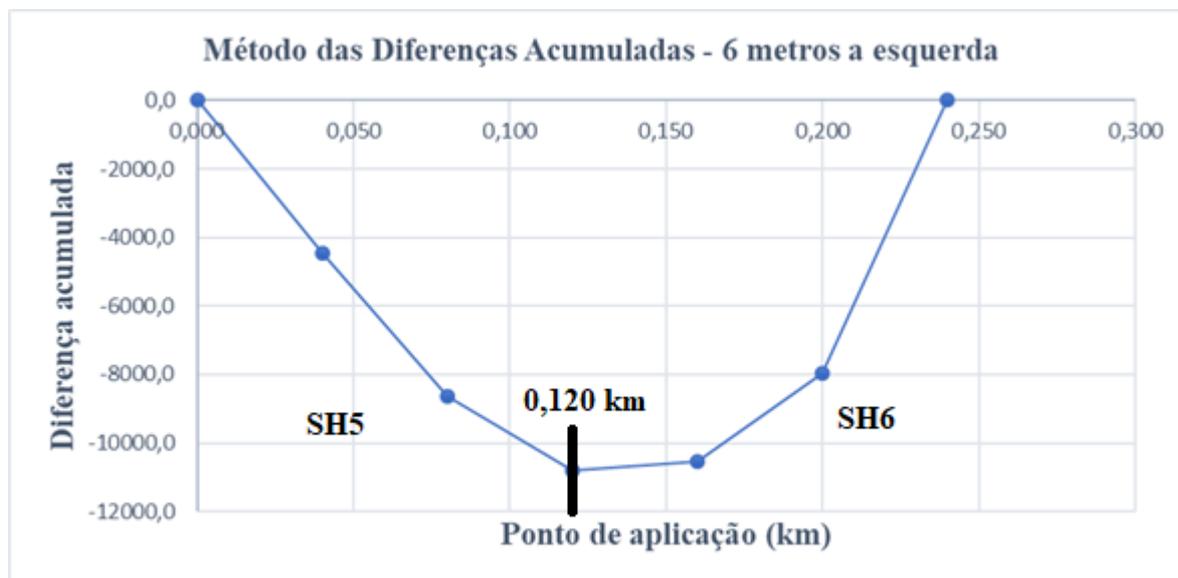
Foram ensaiados, ainda, segmentos com *offsets* de 6 metros a direita e a esquerda com relação ao eixo da *Taxiway M*. Os gráficos resultantes do MDA para cada um desses ensaios são apresentados nos Gráficos 2 e 3, respectivamente.

Gráfico 2 - Diferença acumulada *versus* Ponto de aplicação - 6 m a direita do eixo da *Taxiway M*



Fonte: o Autor

Gráfico 3 - Diferença acumulada versus Ponto de aplicação - 6 m a esquerda do eixo da Taxiway M



Fonte: o Autor

A inclinação da equação do Gráfico 2 demonstra que esse trecho ensaiado pode ser dividido em dois segmentos homogêneos, de 0 a 160 metros, Segmento Homogêneo 3 (SH3), e de 160 a 240 metros, Segmento Homogêneo 4 (SH4). O Gráfico 3, correspondente ao *offset* de 6 metros a esquerda, mostra que esse trecho pode também ser dividido em dois segmentos homogêneos, de 0 a 120 metros, Segmento Homogêneo 5 (SH5), e de 120 a 240 metros, Segmento Homogêneo 6 (SH6).

Todas as análises realizadas, para a determinação da condição estrutural do pavimento, foram feitas, individualmente, para cada segmento homogêneo. Cada um dos trechos ensaiados foi dividido em dois segmentos homogêneos. na Tabela 9 é apresentado um resumo dos SH obtidos no método das diferenças acumuladas.

Tabela 8 - Resumo dos segmentos homogêneos

Segmento Homogêneo	Extensão - Localização
SH1	0 a 160 metros – Eixo
SH2	160 a 240 metros – Eixo
SH3	0 a 160 metros – 6 metros a direita
SH4	160 a 240 metros – 6 metros a direita
SH5	0 a 120 metros – 6 metros a esquerda
SH6	120 a 240 metros – 6 metros a esquerda

Fonte: o Autor

Os dados deflectométricos obtidos com os ensaios de FWD foram separados de acordo com cada um dos SH e tratados estatisticamente como especificado em DNER (1979),

sendo determinados, assim, a deflexão média, o desvio padrão, limites admissíveis e a deflexão característica. O Apêndice B apresenta uma tabela com os resultados do tratamento estatístico para cada um dos SH.

Observando as deflexões, nota-se que os segmentos SH1, SH2 e SH3 tem suas deflexões médias bem menores que os segmentos SH4, SH5 e SH6, sendo SH6 o trecho que apresenta os maiores valores médios de deflexão, indicando que o SH6 é mais deformável quando da aplicação de cargas e ainda possui menor rigidez.

4.3 Retroanálise - *software* BAKFAA

Após o tratamento estatístico dos resultados do ensaio de FWD para cada segmento homogêneo foi realizada a retroanálise com auxílio do *software* BAKFAA, de forma que foram utilizadas as deflexões médias \pm desvio padrão e feita a média dos resultados para cada SH. A Tabela 11 apresenta as médias dos resultados do ajuste dos módulos de resiliência para cada SH.

Tabela 9 - Médias dos resultados de Módulo de Resiliência para cada SH

Média dos resultados dos SH				
Segmento Homogêneo	Camada	Espessura (cm)	Mr (Mpa)	Poison
SH1	CAUQ	23	4887,90	0,30
	BGS	35	651,73	0,35
	SUBLEITO	50	488,77	0,40
SH2	CAUQ	23	3309,22	0,30
	BGS	35	441,23	0,35
	SUBLEITO	50	330,92	0,40
SH3	CAUQ	23	4453,31	0,30
	BGS	35	593,79	0,35
	SUBLEITO	50	445,32	0,40
SH4	CAUQ	23	3638,40	0,30
	BGS	35	485,32	0,35
	SUBLEITO	50	363,99	0,40
SH5	CAUQ	23	4495,33	0,30
	BGS	35	599,39	0,35
	SUBLEITO	50	449,53	0,40
SH6	CAUQ	23	3139,28	0,30
	BGS	35	418,57	0,35
	SUBLEITO	50	313,92	0,40

Fonte: o Autor

A exemplo da análise anterior, na qual o SH6 apresentou maiores deflexões, nessa também o SH6 obteve os menores resultados de Módulo de Resiliência dentre os segmentos homogêneos estudados. Esse resultado valida a hipótese de que SH6 é o trecho com menor resistência a aplicação de carregamentos, sendo assim o de menor capacidade de suporte.

4.4 Determinação da vida útil do pavimento – FAARFIELD

A determinação da vida útil do pavimento foi realizada pelo programa FAARFIELD. Para modelagem da *Taxiway* estudada foram criadas seções com camadas de materiais nomeadas pelo *software* como *User defined*. Elas permitem ao usuário introduzir o Módulo de Resiliência desejado para cada camada do pavimento e utilizados os módulos obtidos pela retroanálise.

O tráfego de aeronaves foi configurado de acordo com o estudo anteriormente apresentado. Sendo assim, utilizado o *mix* de aeronaves resultante desta análise. Os resultados de vida útil, obtidos pelo FAARFIELD para cada um dos SH, são apresentados na Tabela 12.

Tabela 10 - Resultados de vida útil obtidos pelo FAARFIELD para cada SH

Resultados obtidos pelo FAARFIELD	
Segmento Homogêneo	Vida Útil Calculada (Anos)
SH1	886.759,4
SH2	886.758,4
SH3	886.758,4
SH4	886.758,4
SH5	886.758,4
SH6	886.758,4

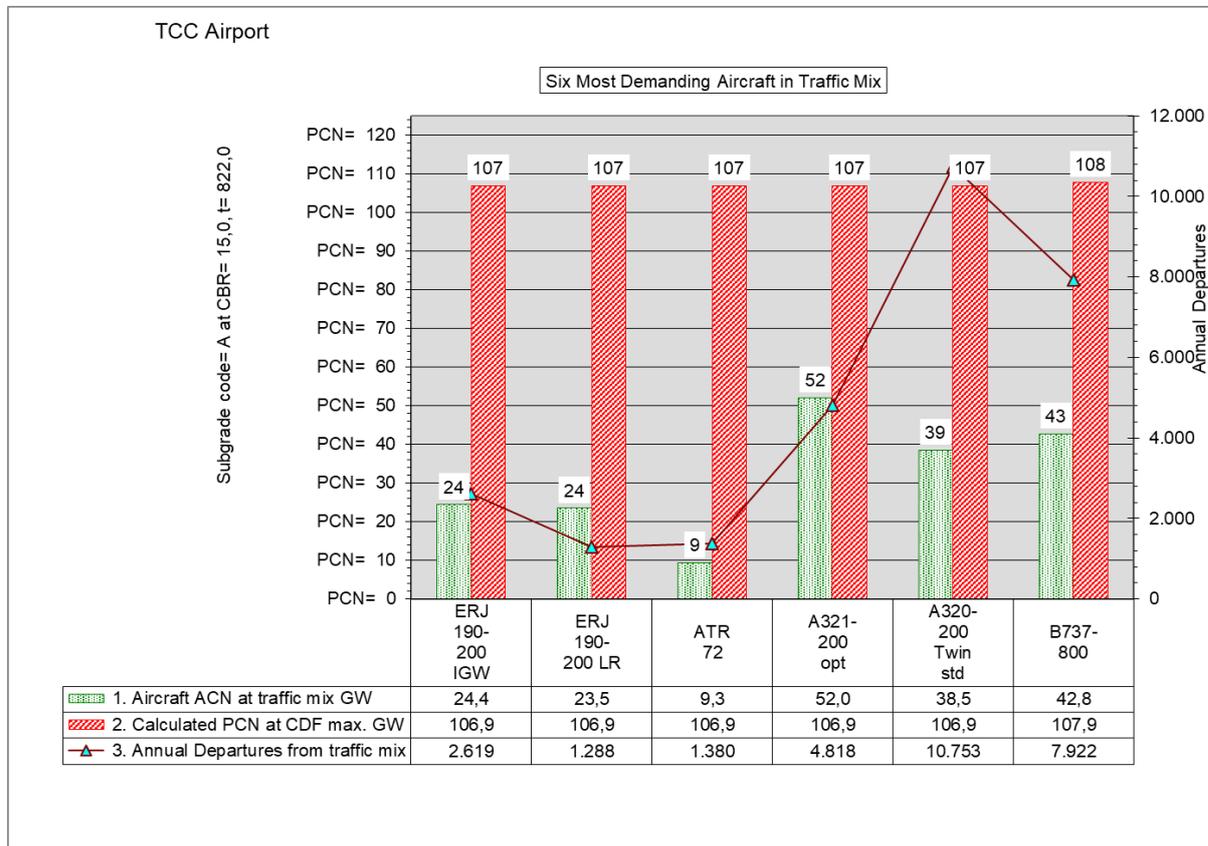
Fonte: o Autor

Para todos os segmentos homogêneos, o *software* retornou uma vida útil da ordem de milhares de anos, apenas o SH1 que o FAARFIELD estimou um ano a mais quando com parados aos outros SH. Isto pode indicar um superdimensionamento da estrutura do pavimento, levando em consideração que ela é composta por 23 cm de CAUQ, 33 cm de BGS e um subleito com alta capacidade de suporte, como modelado pelo *software* BAKFAA.

4.5 Determinação do PCN – COMFAA

Para a determinação do PCN do pavimento estudado foi utilizado o *software* COMFAA, disponibilizado pela FAA. Como dados de entrada foram os mesmos para todos os SH, foi necessário fazer apenas uma análise. O programa retornou gráficos que apresentam as seis aeronaves que mais demandam do pavimento no *mix* médio, o ACN imposto pelo tráfego de cada aeronave e o PCN baseado no dano acumulado de cada aeronave, para cada um dos anos. O Gráfico 4 apresenta os resultados para o *mix* representativo da média dos 5 anos.

Gráfico 4 - Resultados da análise do COMFAA 3.0 para o *mix* médio



Fonte: o Autor

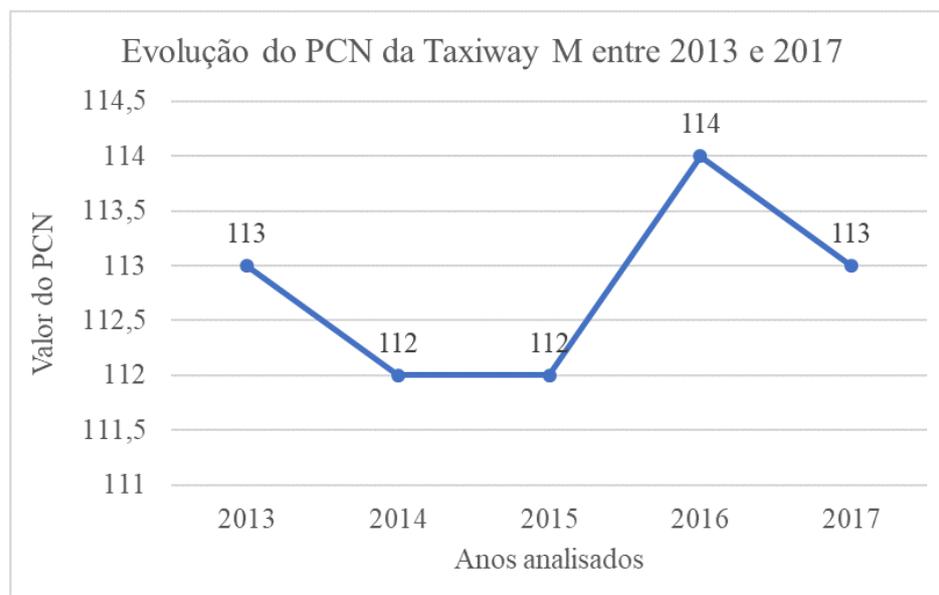
O COMFAA indicou que a aeronave mais solicitante do *mix* médio é o A321-200, com ACN de 52 e PCN de 107. Como aeronave com maior tráfego sobre o pavimento estudado está o A320-200, que possui mais que o dobro de operações da aeronave mais solicitante em termos de carregamento. O PCN adotado é o maior obtido dentre as aeronaves, neste caso o referente a B737-800 com valor de 108.

Com relação aos demais parâmetros do PCN e seus respectivos códigos para apresentação, foi utilizado o método de avaliação técnica (T), o pavimento é do tipo flexível (F), a resistência do subleito é maior que 13 %, sendo utilizado o normalizado igual a 15 % (A) e pressão de pneus ilimitada (W), pois, como citado por FAA (2014) o revestimento em CAUQ, a partir da espessura de 4 polegadas, pode resistir a pressões de pneus maiores que 218 psi (1,5 MPa), enquadrando-se na faixa “W”.

Feitas as observações anteriores, o PCN deste pavimento pode ser publicado, pelo operador do aeródromo, na forma do código PCN 108/F/A/W/T.

Foi feita, ainda, a análise da evolução do PCN da *Taxiway M* ao longo dos anos do estudo. Para cada ano de 2013 a 2017 foi gerado um gráfico apresentando o seu PCN, eles são apresentados nos apêndices C, D, E, F e G, já os demais parâmetros são os mesmos dos apresentados na análise realizada com o *mix* médio por se tratar do mesmo pavimento. O Gráfico 5 apresenta a evolução do PCN ao longo dos 5 anos.

Gráfico 5 - Evolução do PCN nos 5 anos analisados



Fonte: o Autor

O Gráfico 5 mostra como o PCN variou ao longo dos 5 anos em função do *mix* de aeronaves utilizado, individualmente todos os anos apresentaram um PCN maior que o do *mix* médio.

4.6 Limitações da Análise

O *mix* de aeronaves utilizado teve como base dados até o ano de 2017, o que pode configurar uma possível desatualização, devido a eventuais mudanças no tráfego no sentido dos modelos de aeronaves operando ou quantidade de operações no ano. Considerando que algumas aeronaves, como o ERJ 190-200IGW e os A320-200, tiveram uma diminuição no número de operações nos anos mais recentes do estudo e que este trabalho é publicado no fim de 2019.

Os ensaios de FWD foram realizados com cargas da ordem de 100 kN, enquanto a aeronave mais pesada do *mix*, o A321-200, tem uma carga de aproximadamente 900 kN sendo aproximadamente 95 % dessa carga distribuída entre 2 trens de pousos principais. A utilização desta carga de menor magnitude no ensaio pode ter mascarado a real resposta do pavimento ao tráfego das aeronaves.

A ausência de informações sobre as camadas do pavimento e o subleito, tais como, a espessura das camadas em cada segmento homogêneo, os Módulos de Resiliência reais e o CBR do subleito, podem ter interferido nos resultados da retroanálise e na determinação da vida útil. Levando em consideração que foram utilizados como dados de partida as características dos materiais da Região Metropolitana de Fortaleza e a mesma estrutura de pavimento para todos os SH.

O Método ACN-PCN, como citado antes, é uma análise baseada no CBR, sendo um método empírico, e os atuais métodos de dimensionamento são baseados nas respostas elástico-lineares dos materiais, Módulos de Resiliência, o que configura uma provável inconsistência entre eles. Existem diversas correlações entre o CBR e o MR, mas estas não apresentam grande precisão em seus resultados, além disso não existe uma publicação em norma dessa correlação. O método ACN-PCN não é recomendado para a avaliação dos pavimentos, mas apenas para auxiliar os operadores de aeródromo em suas tomadas de decisão, quanto a operacionalidade de aeronaves e condição de suas pistas.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo serão expostas as principais conclusões deste estudo, que teve como principal objetivo a análise da capacidade estrutural de um pavimento aeroportuário por meio do Método ACN-PCN. Serão descritos comentários sobre os ensaios realizados que embasaram este trabalho e as diversas análises feitas para a apresentação dos resultados.

5.1 Principais Conclusões

O Método ACN-PCN desde sua apresentação, em 1981, tem sido utilizado por fabricantes de aeronaves, operadores de aeródromo e trabalhadores do ramo aeronáutico como uma ferramenta para auxílio a tomada de decisão sobre a realização de operações em pavimentos. Ele foi aplicado neste trabalho a fim de avaliar a condição estrutural do pavimento de uma *taxiway* pertencente a um aeroporto brasileiro, determinando, assim, se sua estrutura está apta ou não a receber o atual tráfego operante neste aeródromo.

A separação dos ensaios resultou em 6 trechos de segmentos homogêneos, que apresentavam matematicamente respostas semelhantes a aplicação das cargas dos ensaios de FWD. O tratamento estatístico dos dados obtidos nos ensaios, de acordo com cada SH, excluiu *outliers* e resultou em 2 conjuntos de deflexões que foram utilizadas como dados de entrada para a retroanálise do pavimento. Particularmente, o SH6 apresentou os maiores valores de deflexões, o que indica que sua estrutura está menos rígida que os demais SH's e se deformando mais quando da aplicação de cargas.

A retroanálise do pavimento realizada a partir das deflexões resultantes do tratamento estatístico e dos valores iniciais de módulo de resiliência, apresentou 2 conjuntos de resultados, consistindo em módulos de resiliência calculados para cada camada do pavimento, em cada SH. Deles, foi calculada a média e apresentada como resultado da retroanálise. Obteve-se que o SH6 apresentou os menores valores de Módulo de Resiliência calculados pelo BAKFAA, o que corrobora com os resultados do tratamento estatístico e indica que este trecho possui uma menor rigidez e uma maior sensibilidade a aplicação de cargas, podendo ser considerado o SH de pior condição estrutural deste estudo, mas ainda assim, apresentou um bom desempenho estrutural nas análises seguintes.

O FAARFIELD retornou como vida útil do pavimento valores da ordem de milhares de anos para todos os segmentos homogêneos, isto indica que o tráfego que atua no pavimento alvo deste estudo pode não causar sérios danos à sua estrutura e ela terá uma longa durabilidade,

se mantida de forma adequada. Este resultado pode, ainda, ter relação com o robusto perfil da estrutura do pavimento em estudo, visto que ele é composto por 23 centímetros de CAUQ na capa de rolamento e 33 centímetros de BGS em sua base. Além disso, o subleito foi considerado com alta capacidade de carga, visto que a retroanálise retornou módulos de resiliência da ordem de 400 MPa e o *software* aproximou seu CBR para um décimo deste valor em função de correlações existentes para este tipo de subleito.

Na análise do PCN ao longo do tempo observou-se que ele se mantinha relativamente alto quando comparado ao ACN das aeronaves, e com baixa variação em relação ao seu valor. Quando comparado ao PCN obtido utilizando o *mix* médio os valores para os anos individualmente se mostraram sempre superiores. Isso indica que o pavimento manteve uma alta capacidade de suporte mesmo com a variação do tráfego ao longo dos últimos anos.

Como principal resultado deste trabalho destaca-se a classificação PCN, obtido utilizando o *mix* médio, do pavimento da *Taxiway M*, pertencente ao TCC *Airport*. O *software* COMFAA indicou as 6 aeronaves que mais solicitam o pavimento estudado, destas 6, o A321-200 foi determinado como aeronave crítica, apresentando um ACN de 52, mas o PCN escolhido para representar o pavimento foi o indicado para o B737-800 no valor de 138, por ser o maior dentre as aeronaves do *mix*. Levando em consideração os demais fatores para a classificação PCN como, o método de determinação do PCN, o tipo de pavimento, a resistência do subleito e a pressão de pneus, tem-se a seguinte classificação para o pavimento, PCN 108/F/A/W/T.

Em resumo, os resultados indicaram que o pavimento da *Taxiway M* se encontra em um estado adequado do ponto de vista estrutural. Apresentando baixas deformações a aplicação das cargas e boa capacidade de suporte desde seu subleito, grande expectativa de vida útil e elevado PCN do pavimento. De forma geral, ela pode receber sem grandes danos estruturais todas as aeronaves que operam no aeródromo estudado, desde que sejam realizadas as ações necessárias a manutenção das características do pavimento.

5.2 Principais limitações

Com respeito as limitações e restrições encontradas para a realização deste estudo pode-se citar: a defasagem quanto as cargas utilizadas nos ensaios de FWD, onde foram utilizadas cargas rodoviárias que podem ter interferido nos resultados da retroanálise.

A escassez de informações quanto propriedades mecânicas das camadas do pavimento e seus materiais para uma adequada modelagem nos *softwares*. E a falta de informações do tráfego de aeronaves nos anos de 2018 e 2019.

5.3 Sugestões para trabalhos futuros

Estão expostos a seguir sugestões para o desenvolvimento de futuras pesquisas que poderão dar continuidade este trabalho:

- a) realização de ensaios de FWD que simulem a real carga atuante sobre o pavimento;
- b) atualização dos dados de tráfego de aeronaves para o corrente ano pesquisado;
- c) análise da capacidade de suporte estrutural utilizando o Método ACR-PCR, em breve sucessor do método utilizado neste estudo;
- d) extração de corpos de prova para cada segmento homogêneo, a fim de verificar a real estrutura do pavimento e as propriedades mecânicas dos materiais constituintes das camadas.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **Manual de Sistema de Gerenciamento de Pavimentos Aeroportuários - SGPA**. [S. l.: s. n.], 2017

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). Superintendência de Infraestrutura Aeroportuária. Alerta aos operadores de aerodromos, 1, 22/03/2019. **Uso de cargas em Ensaio Não Destrutivos (END) com o objetivo de se determinar o PCN de pavimentos aeroportuários**. Brasília, 2019

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. **Relatório de monitoração de pavimento**. Brasília: [s. n.], 2019. Disponível em: http://www.antt.gov.br/backend/galeria/arquivos/relatorio_de_monitoracao_de_pavimento__condicoes_de_superficie.docx. Acesso em: 6 jul. 2019

AGUIAR, Júlio César Mascarenhas. **Radar de penetração no solo (GPR): aspectos geofísicos e geodésicos, processamento e análise em pavimento flexível**. 2005. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Rio de Janeiro, 2005.

ANAC. **Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Nº 153**, de 7 de fevereiro de 2019. Agência Nacional de Aviação Civil. Secretaria de Aviação Civil. Brasília, DF, 2019.

ANAC. **Orientações para aplicação do método ACN-PCN**. Instrução Suplementar – IS Nº 153.103-001. Agência Nacional de Aviação Civil. Brasília, 2016

AASHTO. **Design of Pavement Structures**. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, DC, 1993.

ASTM. **Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications**. D 6951-03. American Society for Testing Materials. West Conshohocken, PA, 2003.

ASTM. **Standard Test Method for Airport Pavement Condition Index Surveys**. D 534012. American Society for Testing Materials. West Conshohocken, PA, 2012.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, Liedi Bariani; SOARES, Jorge Barbosa; MOTTA, Laura Maria Goretti da; CERATTI, José Augusto Pereira. **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobrás: Abeda, 2006

DURÁN, Jorge Braulio Cossío. **Sistema de Gerência de Pavimentos Aeroportuários: Estudo de Caso no Aeroporto Estadual de Araraquara**. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Departamento de Engenharia de Transporte da Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, 2015.

DNER. **Determinação de deflexões utilizando deflectômetro de impacto tipo “Falling Weight Deflectometer (FWD)”**. Norma DNER-PRO 273/96. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, RJ, 1996.

DNER. **Avaliação Estrutural de Pavimentos Flexíveis**. Norma DNER-PRO 011/79. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, RJ, 1979.

DNIT. **Manual de Pavimentação**. Publicação IPR-719. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Pesquisas Rodoviárias. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, RJ, 2006.

DYNATEST. **Falling Weight Deflectometer (FWD)**. 2019. Dynatest Engenharia Ltda. Disponível em <<http://dynatest.com.br/falling-weight-deflectometer-fwd/>>. Acesso em: 06 jun. 2019.

FAA. **Use of Nondestructive Testing in the Evaluation of Airports Pavements**. Advisory Circular – 150/5370-11b. Federal Aviation Administration. United States Department of Transportation. Washington, DC, 2011

FAA. **Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength - PCN**. Advisory Circular – 150/5335-5C. Federal Aviation Administration. United States Department of Transportation. Washington, DC, 2014

FABRE, Cyril. **The Aircraft Classification Rating – Pavement Classification Rating ACR-PCR**. Cidade de Quito: XIV Seminario ALACPA de Pavimentos Aeroportuarios, 2018.

FERREIRA, Josué Catharino Ferreira. **Um breve histórico da aviação comercial brasileira**. In: XII Congresso Brasileiro de História Econômica e 13º Conferência Internacional de História de Empresas. Agosto 2017. Niterói/RJ.

ICAO. **Manual de proyecto de aeródromos**. Parte 3. Pavimentos. Segunda edición. Organización de Aviación Civil Internacional. Lima, Peru, 1983.

LOPES, Osvaldo Antunes. **Uso do GPR (Ground Penetrating Radar) em trechos de pavimentos da cidade universitária da UFRJ**. 2009. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

MACEDO, Marcelo de Canossa. **Estudo para a base técnica de um sistema de gerência de pavimentos para redes regionais de aeroportos**. 2005. Tese (Doutorado em Ciência) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Aeronáutica e Mecânica, São Paulo, 2005

MACÊDO, José Afonso Gonçalves de. **Interpretação de ensaios defletométricos para avaliação estrutural de pavimentos flexíveis**. 1996. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, São Paulo, 1996.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES, PORTOS E AVIAÇÃO CIVIL - MTPA. **Anuário Estatístico de Transporte**. [S. l.], 2018. PDF.

MORAES, Carla Gonçalves de. **Análise de bacias deflectométricas obtidas por 4 equipamentos do tipo Falling Weight Deflectometer (FWD)**. 2015. Dissertação (Mestrado) - UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2015.

NIKOLAIDES, Athanassios. **Highway engineering: Pavements, materials and control of quality**. Flórida: CRC Press, 2014. ISBN 978-1-4665-7997-2.

OLIVEIRA, Francisco Heber Lacerda de. **Considerações sobre a Prática dos Serviços de Remoção de Borracha em Pavimentos Aeroportuários**. In: 39ª. Reunião Anual de Pavimentação – 39ª. RAPv. 13º. Encontro Nacional de Conservação Rodoviária – 13º. ENACOR. Setembro 2008. Recife/PE.

OLIVEIRA, Francisco Heber Lacerda de. **Proposição de Estratégias de Manutenção de Pavimentos Aeroportuários Baseadas na Macrotextura e no Atrito: Estudo de Caso do Aeroporto Internacional de Fortaleza**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

OLIVEIRA, Francisco Heber Lacerda de. **Desenvolvimento de um modelo de gerenciamento de pavimentos aeroportuários como apoio à tomada de decisão sobre estratégias de manutenção e reabilitação**. 2016. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2016.

RIBEIRO, Antonio Júnior Alves. **Um modelo de previsão do módulo de resiliência dos solos no estado do ceará para fins de pavimentação**. 2016. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2016.

RIOGALEÃO. Declaração de capacidade. **Declaração de capacidade operacional Galeão**, Rio de Janeiro, 16 abr. 2018.

TORRES, Vanessa Corrêa de Andrade. **Ensaio de cone de penetração dinâmica para controle de compactação de vias urbanas da cidade de Curitiba/PR**. 2017. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Curitiba, 2017.

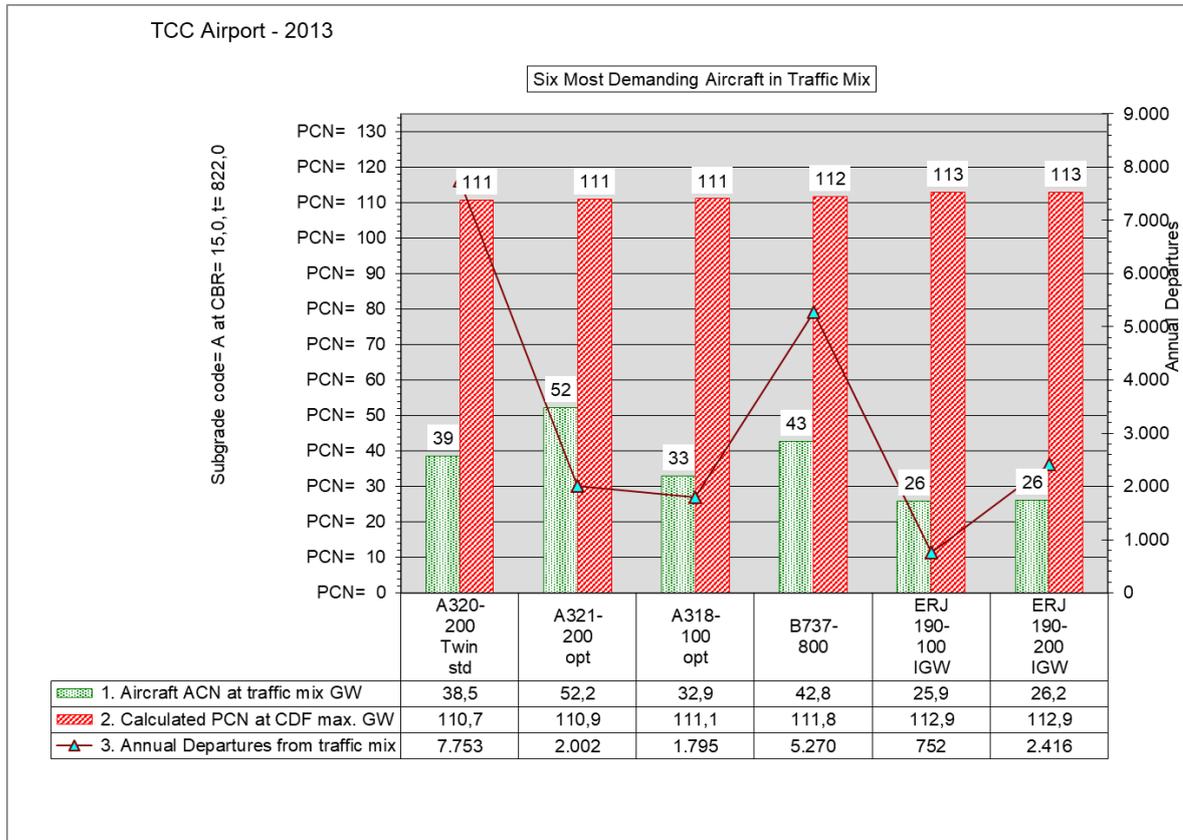
APÊNDICE A – MIX DE AERONAVES REPRESENTATIVO PARA OS ANOS ENTRE 2013 E 2017

Ano	Aeronaves	Pouso	Decolagem	% de operações no ano	% de operações (ponderado para 100%)
2013	A318-100	1795	1796	5,37	8,98
	A320-200	7756	7754	23,20	38,79
	A321-200	2000	2002	5,99	10,02
	B737-800	5269	5269	15,77	26,37
	ERJ 190-100 IGW	751	751	2,25	3,76
	ERJ 190-200 IGW	2416	2416	7,23	12,09
2014	A318-100	1437	1437	4,18	6,70
	A320-200	7207	7208	20,96	33,61
	A321-200	3319	3317	9,65	15,47
	B737-800	7069	7069	20,56	32,97
	ERJ 190-200 IGW	2409	2410	7,01	11,24
2015	A318-100	1075	1075	3,49	4,97
	A320-200	6084	6081	19,74	28,12
	A321-200	4305	4304	13,97	19,90
	ATR-72-212A	1095	1093	3,55	5,06
	B737-800	6880	6880	22,33	31,80
	ERJ 190-200 IGW	2198	2198	7,13	10,16
2016	A318-100	865	864	3,25	4,66
	A320-200	4680	4681	17,60	25,23
	A321-200	4298	4297	16,16	23,17
	ATR-72-212A	1130	1131	4,25	6,09
	B737-800	5483	5484	20,63	29,57
	ERJ 190-200 IGW	2092	2091	7,87	11,28
2017	A318-100	702	702	2,68	3,73
	A320-200	6048	6047	23,1	32,15
	A321-200	3982	3984	15,22	21,18
	ATR-72-212A	700	701	2,68	3,73
	B737-800	5497	5495	21,00	29,23
	ERJ 190-200 IGW	1023	1024	3,91	5,44
	ERJ 190-200 LR	854	854	3,26	4,54

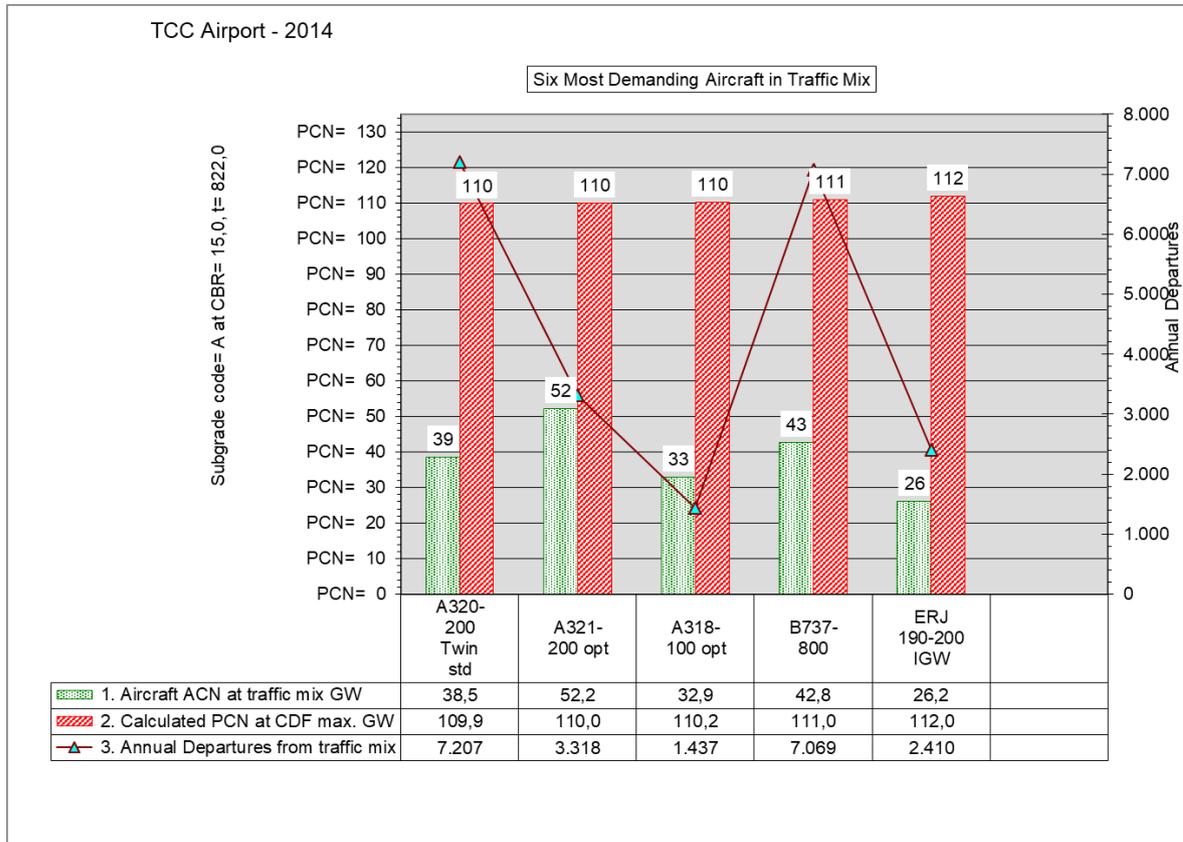
**APÊNDICE B – RESULTADOS DO TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS ENSAIOS
FWD**

Segmento Homogêneo	Deflexão (mm)		Desvio Padrão (mm)	Limites admissíveis (mm)		Deflexão (mm) + Desvio Padrão (mm)	Deflexão (mm) - Desvio Padrão (mm)
	D ₀ médio	D ₂₀ médio		L ₁	L ₂		
SH1	D ₀ médio	24,1	7,2	38,4	9,8	31,3	16,9
	D ₂₀ médio	20,3	6,1	32,5	8,2	26,4	14,3
	D ₃₀ médio	17,8	5,6	29,0	6,7	23,4	12,3
	D ₄₅ médio	14,7	4,3	23,4	6,1	19,1	10,4
	D ₆₀ médio	12,3	3,5	19,3	5,3	15,8	8,8
	D ₉₀ médio	8,1	2,2	12,5	3,6	10,3	5,8
	D ₁₂₀ médio	5,2	1,2	7,6	2,7	6,4	4,0
SH2	D ₀ médio	24,1	7,2	38,4	9,8	31,3	31,6
	D ₂₀ médio	20,3	6,1	32,5	8,2	26,4	26,4
	D ₃₀ médio	17,8	5,6	29,0	6,7	23,4	22,7
	D ₄₅ médio	14,7	4,3	23,4	6,1	19,1	18,0
	D ₆₀ médio	12,3	3,5	19,3	5,3	15,8	14,3
	D ₉₀ médio	8,1	2,2	12,5	3,6	10,3	6,0
	D ₁₂₀ médio	5,2	1,2	7,6	2,7	6,4	2,8
SH3	D ₀ médio	24,6	6,3	37,1	12,1	30,9	18,3
	D ₂₀ médio	21,4	5,3	32,1	10,7	26,7	16,1
	D ₃₀ médio	18,9	4,6	28,2	9,6	23,5	14,3
	D ₄₅ médio	15,9	3,8	23,5	8,2	19,7	12,0
	D ₆₀ médio	13,2	3,2	19,6	6,7	16,4	9,9
	D ₉₀ médio	8,8	2,1	12,9	4,6	10,8	6,7
	D ₁₂₀ médio	5,8	1,4	8,5	3,0	7,1	4,4
SH4	D ₀ médio	34,4	10,4	44,9	24,0	44,9	24,0
	D ₂₀ médio	29,3	7,7	37,0	21,6	37,0	21,6
	D ₃₀ médio	24,9	5,8	30,7	19,0	30,7	19,0
	D ₄₅ médio	20,1	4,1	24,2	16,0	24,2	16,0
	D ₆₀ médio	16,0	3,3	19,3	12,7	19,3	12,7
	D ₉₀ médio	9,9	2,1	12,0	7,8	12,0	7,8
	D ₁₂₀ médio	6,2	0,8	7,0	5,4	7,0	5,4
SH5	D ₀ médio	32,3	14,7	54,4	10,2	47,0	17,6
	D ₂₀ médio	27,3	11,9	45,2	9,4	39,2	15,3
	D ₃₀ médio	23,3	10,0	38,3	8,4	33,3	13,4
	D ₄₅ médio	19,0	7,7	30,5	7,5	26,6	11,3
	D ₆₀ médio	15,0	5,7	23,5	6,4	20,7	9,3
	D ₉₀ médio	9,1	3,2	13,9	4,4	12,3	5,9
	D ₁₂₀ médio	5,6	1,7	8,1	3,1	7,2	3,9
SH6	D ₀ médio	47,6	14,1	68,7	26,5	61,7	33,5
	D ₂₀ médio	38,3	8,5	51,1	25,5	46,8	29,8
	D ₃₀ médio	31,9	5,9	40,8	22,9	37,8	52,9
	D ₄₅ médio	24,3	3,5	29,5	19,0	27,7	20,8
	D ₆₀ médio	17,8	2,6	21,7	13,9	20,4	15,2
	D ₉₀ médio	9,8	2,4	13,3	6,2	12,1	7,4
	D ₁₂₀ médio	5,6	1,6	7,9	3,2	7,1	4,0

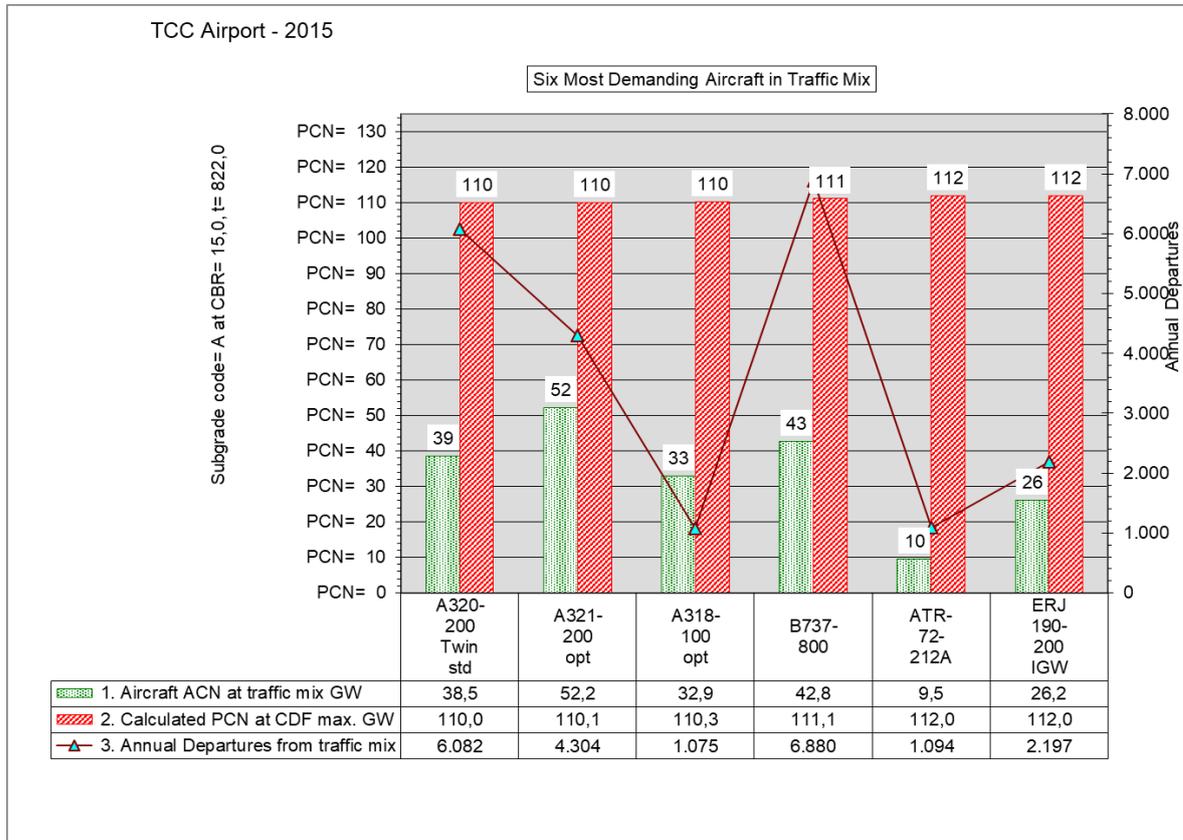
APÊNDICE C – PCN PARA O MIX DE AERONAVES DE 2013



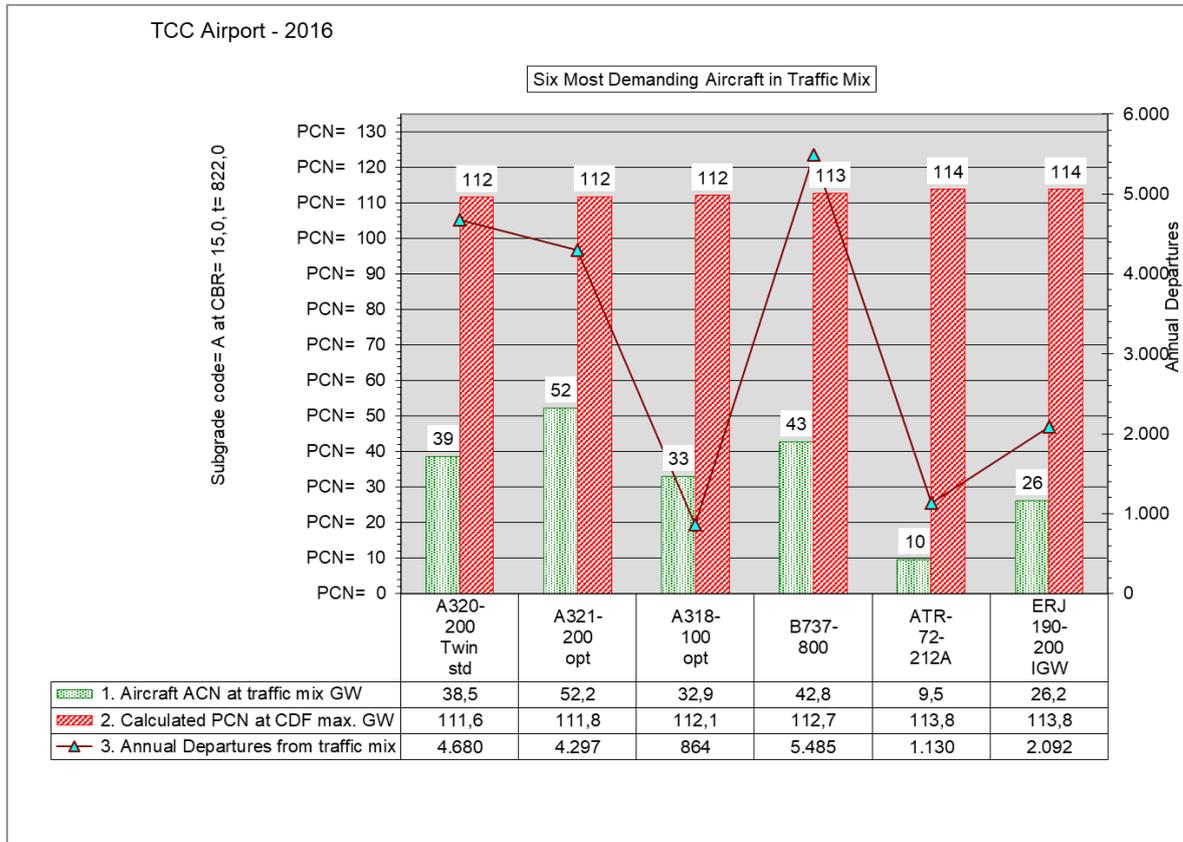
APÊNDICE D – PCN PARA O MIX DE AERONAVES DE 2014



APÊNDICE E – PCN PARA O MIX DE AERONAVES DE 2015



APÊNDICE F – PCN PARA O MIX DE AERONAVES DE 2016



APÊNDICE G – PCN PARA O MIX DE AERONAVES DE 2017

