
UTILIZAÇÃO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS EM PISTAS DE POUSO E DECOLAGEM

Aline Antunes Rodrigues

Ana Clara Avancini

Bruno Marcellino Carvalho

Bruno Thomaz Guimarães

Yuri Guenda de Paula

Patricia Barboza da Silva

Oswaldo Sansone

Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM)

Resumo

O objetivo deste artigo foi comparar o uso de pavimento flexível ao de pavimento rígido em pistas de pouso e decolagem. Utilizou-se o *software* FAARFIELD para dimensionar uma pista de pouso e decolagem para o aeroporto de Guarulhos em cada um dos pavimentos. Com o mesmo *software* e o estabelecimento de um modelo de desempenho, foram analisadas a vida útil e a execução para cada pista dimensionada. Também se estabeleceu uma estratégia de manutenção e se desenvolveu um sistema de gerenciamento para cada tipo de pavimento. Por fim, com a análise comparativa de custo para cada alternativa, foi possível demonstrar maior durabilidade no caso do pavimento rígido e, com a sua aplicação, menor necessidade de intervenção posterior.

Palavras-chave: Aeroportos. Análise de desempenho. Dimensionamento.

1 INTRODUÇÃO

As pistas de pouso e decolagem são vias estabelecidas em um aeródromo terrestre, com a função de permitir, evidentemente, o pouso e a decolagem de aeronaves, conforme estabelece a norma NBR 9719 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997). Podem ser criadas com pavimento flexível ou com pavimento rígido.

As cargas que podem atuar nos pavimentos de aeródromos podem ter 100 tf ou mais por trem de pouso principal. Porém, ao contrário do que ocorre em rodovias, os aeródromos possuem uma frequência de aplicação menor, abaixo de 100.000 na vida de serviço (MEDINA; MOTTA, 2005). Dessa forma, as deformações impostas são resultantes do tipo de aeronave, da carga do trem de pouso, do número de passagens e da distribuição transversal das cargas, devendo tais fatores serem levados em conta no dimensionamento da pista. No dimensionamento do pavimento de pistas de pouso e decolagem também são levadas em consideração a carga por roda de aeronave e a resistência mecânica do solo, obtida mediante o Índice de Suporte Califórnia (ISC) do subleito em pavimentos flexíveis, ou por meio do coeficiente de reação do subleito no caso de pavimentos rígidos (RAMOS *et al.*, 2017).

Os aeroportos no Brasil, em sua maioria, usam pavimentos flexíveis em áreas de pouso e decolagem, com exceção do aeroporto do Galeão, no Rio de Janeiro, que utiliza pavimento rígido. Em contrapartida, nos Estados Unidos, por exemplo, a maioria das pistas de pouso e decolagem é projetada em pavimento rígido.

A Cement Concrete & Aggregates Australia (2014) indica as vantagens do uso de pavimentos rígidos no âmbito de custo, durabilidade e manutenção. Todavia, não faz uma comparação efetiva entre o rígido e o flexível, já que não apresenta suas desvantagens. A Minnesota Asphalt Pavement Association (2014), por sua vez, apresenta as vantagens na escolha do pavimento flexível ao explicitar, por exemplo, a velocidade na construção, a baixa manutenção e a questão dos custos, mas não demonstra suas desvantagens em comparação com o pavimento rígido.

O dimensionamento de pavimentos aeroportuários é realizado por meio de um conjunto de fatores predefinidos pelos diversos métodos existentes no cenário internacional, todos de acordo com o *Aerodrome Design Manual* (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, 2006), que também define as diretrizes que devem ser seguidas para quaisquer assuntos relacionados a aeródromos em todo o mundo.

Um dos métodos mais difundidos é o elaborado pela Federal Aviation Administration (FAA) (ESTADOS UNIDOS, 2016), que fornece orientações para o

dimensionamento de pavimentos rígidos e flexíveis. Atualmente, esse é o método mais utilizado para o dimensionamento de pavimentos aeroportuários no Brasil (RAMOS *et al.*, 2017). Para a sua aplicação, é necessário conhecer as características de resistência do subleito, a carga máxima da aeronave e o número máximo de decolagens anuais. Esses parâmetros são utilizados como entrada para os ábacos elaborados, considerando uma vida útil de 20 anos (MIRANDA, 2015).

Com as novas atualizações do método FAA, os ábacos e diagramas para o cálculo mecanicista do pavimento não são mais necessários, pois atualmente está disponível o *software* computacional FAARFIELD. A mais nova atualização do método é a AC 150/5230-6F (ESTADOS UNIDOS, 2016). Nela, são definidas as etapas para o cálculo da espessura do pavimento com o uso do FAARFIELD.

Para que um pavimento aeroportuário apresente o desempenho para o qual foi dimensionado, é importante realizar as manutenções necessárias durante a sua vida útil e, para uma adequada avaliação técnica e economicamente dessas manutenções, realizar o gerenciamento desses pavimentos é essencial. Dessa forma, o gerenciamento de pavimentos abarca todas as atividades envolvidas no planejamento, no projeto, na construção e na manutenção dos pavimentos que fazem parte de uma infraestrutura viária. Sendo assim, a adoção de um sistema de gerenciamento de pavimentos aeroportuários, a partir do gerenciamento eficaz dos recursos disponíveis, permite uma melhoria contínua no nível de serviço e na segurança (BRASIL, 2017).

Um Sistema de Gerenciamento de Pavimentos Aeroportuários (SGPA) permite avaliar a condição atual de um pavimento e prever condições futuras. Por esse motivo, sua implantação garante mais condições de segurança de pouso e decolagem, pois, para que se consiga garantir a segurança dos pousos e das decolagens nesses pavimentos, é necessário que ele apresente características específicas, como atrito, irregularidade e capacidade estrutural adequados (BARROS, 2008). A degradação dos pavimentos ocorre ao longo da sua vida útil de forma gradual, em função de diversos fatores, como tráfego, clima, suporte do solo do subleito, entre outros. Ao longo da vida de serviço, o estado do pavimento tende a cair acentuadamente em qualidade em um intervalo de tempo muito curto (BRASIL, 2017). Esse comportamento exige manutenções para que as condições do pavimento sejam preservadas em seu nível mais alto. Dessa forma, os SGPA permitem, além de uma manutenção com base na correção de problemas, o seu planejamento, capaz de prolongar sua vida útil e garantir padrões adequados de serviço (DURÁN; FERNANDES, 2015). Além disso, é importante levar em conta que, com o tempo, o custo das manutenções passa a crescer, perdendo a sua vantagem econômica (BRASIL, 2017).

Um SGPA pode ser aplicado em nível de rede ou de projeto. O primeiro engloba toda a rede de pavimentos e objetiva soluções para as necessidades orçamentárias de curto e médio prazos ou condição geral do pavimento. O segundo analisa um trecho

específico da rede e objetiva soluções com melhor aproveitamento técnico e econômico para cada trecho; assim, sugere-se que o nível de rede seja utilizado para pavimentos aeroportuários (BRASIL, 2017).

Para estabelecer o SGPA em nível de rede em pavimentos aeroportuários, é necessário que sejam seguidas as etapas subsequentes, conforme indicadas pela Agência Nacional de Aviação Civil – Anac (BRASIL, 2017):

- a) definir a rede pavimentos que será gerenciada, a área típica do pavimento que consiste na parte da rede de pavimentos com uma função distinta, como a pista de pouso e decolagem, por exemplo;
- b) em seguida, selecionar uma seção do pavimento que consiste em “uma área contínua do pavimento contendo o mesmo histórico de construção, de manutenção e de uso” (BRASIL, 2017, p. 21);
- c) selecionar uma unidade amostral, que, em pavimentos rígidos, consiste em 20 placas de concreto contíguas e, em pavimentos flexíveis, em 450 m²;
- d) formar um banco de dados da rede de pavimentos selecionada, o qual deve conter o inventário da rede, os dados de tráfego, a condição funcional do pavimento, a condição estrutural e os custos das alternativas de manutenção e reabilitação.

A condição funcional analisa irregularidade, atrito, macrotextura e defeitos no pavimento, e pode ser obtida por meio do cálculo do Índice de Condição de Pavimento (PCI), índice numérico, variando de zero a 100, sendo zero uma condição de ruptura e 100 uma condição excelente. Esse índice mede a condição funcional e operacional da superfície e é determinado por meio da inspeção visual do pavimento e das anomalias nele contidas. Dessa forma, são organizados os diferentes tipos de defeitos presentes na superfície do pavimento, seja rígido, seja flexível, em função do tipo e da gravidade do defeito (BARROS, 2008).

De acordo com a Anac (BRASIL, 2017), a metodologia de cálculo do PCI é baseada em fatores de ponderação ou valores deduzidos de zero a 100, que indicam o impacto das anomalias na condição do pavimento. A soma dos valores deduzidos resulta num valor deduzido total (VDT). Em seguida, utilizando-se gráficos, é feita uma correção, resultando no valor deduzido corrigido (VDC), que possibilita calcular o valor do PCI da amostra e, logo após, o da seção a partir das equações 1 e 2 (BRASIL, 2017):

$$PCI \text{ da amostra} = 100 - VDC \quad (1)$$

$$PCI \text{ da seção} = \frac{(N - A) \times PCIr - A \times PCIa}{N} \quad (2)$$

Em que:

N – número total de amostras na seção;

A – número total de amostras adicionais avaliadas;

PCIa – PCI médio das amostras adicionais;

PCIr – PCI médio das amostras representativas.

A condição estrutural indica como o pavimento evoluirá ao longo do tempo sem nenhuma intervenção e é composta pela integridade e capacidade estrutural. A primeira é a quantidade de descontinuidades apresentadas, a segunda consiste na capacidade que as camadas têm de suportar os efeitos da repetição de cargas. Também são necessários para o gerenciamento os dados de tráfego (tipo, modelo, configuração da aeronave), a frequência de operações e a classificação de tráfego (BRASIL, 2017).

Ainda segundo a Anac (BRASIL, 2017), também é necessário obter o inventário do pavimento, o qual deve apresentar as seguintes informações: localização e identificação da rede; classe do pavimento; geometria; materiais e espessuras das camadas; histórico da construção; histórico de manutenção e reabilitação; e condição do sistema de drenagem e da sinalização e o sistema referencial. Todos esses parâmetros, aliados aos custos dos diversos tipos de manutenção, são essenciais para o desenvolvimento de um sistema de gerenciamento de pavimentos aeroportuários.

Outro parâmetro importante ao gerenciamento é a vida útil de um pavimento, que indica o tempo no qual a estrutura funcionará sem perder suas características essenciais de desempenho. Sendo assim, a alteração das propriedades mecânicas dos materiais que constituem o pavimento devido às cargas das aeronaves, aos produtos químicos e às ações ambientais, contribui para a diminuição de sua vida útil (MARTINS, 2017).

O pavimento aeroportuário, assim como em outros casos, é projetado para uma vida útil predeterminada (período de projeto); no entanto, para que esse período seja atendido, levam-se em conta diversos fatores como: *mix* de aeronaves, qualidade dos materiais utilizados e da construção, e rotina de manutenção (ESTADOS UNIDOS, 2016).

Para pistas de pouso e decolagem em pavimentos rígidos, considera-se a vida útil entre 20 e 40 anos (YOUNG, 2014). Já para as estruturas de pavimento flexível, esse período é, em média, de 15 a 20 anos.

Os estudos de vida útil podem ser usados para desenvolver modelos de sistema de gerenciamento de pavimentos, quantificação dos benefícios ambientais da reciclagem de pavimentos e análises da aderência pneu-pavimento (HEN, 2017).

A vida útil do pavimento pode ser dividida em vida estrutural e vida funcional. A primeira refere-se à habilidade da estrutura de suportar as cargas das aeronaves, e a segunda, às solicitações não estruturais, que podem gerar danos à superfície, impactando a segurança operacional da pista (BRILL, 2014). A análise de vida útil de um pavimento pode ser realizada por meio de avaliações estruturais e funcionais. A avaliação estrutural é o estudo da adequação e capacidade do conjunto pavimento de resistir aos efeitos de deterioração produzidos pelas cargas cíclicas do tráfego e do clima (HENRIQUE, 2013), e pode ser feita por meio da determinação das deflexões da estrutura quando submetida a uma carga na sua superfície (NECKEL, 2017). A avaliação funcional tem como objetivo aferir o conforto ao rolamento, características de segurança e resistência à derrapagem, por meio das características da superfície do pavimento, e pode ser realizada por meio de análises da aderência pneu-pavimento, da textura do revestimento e da irregularidade (MERIGHI, 2017).

A análise da vida útil do pavimento é importante para assegurar a sua qualidade de rolamento e, assim, garantir suas características de segurança e definição das operações de manutenção necessárias. Por isso, essa análise deve ser feita em ordem de se estabelecer um bom sistema de gerenciamento de aeroportos (ESTADOS UNIDOS, 2016).

Pode-se obter a vida útil de um pavimento por meio do uso do *software* FAARFIELD, desenvolvido pela FAA, utilizando modelos baseados em testes conduzidos desde 1940. O *software* considera uma estrutura de elementos finitos que possibilita projetar as camadas de pavimentos tanto rígidos quanto flexíveis, e verificar a vida útil de um pavimento existente, o que, por sua vez, permite projetar camadas de recapeamento (ESTADOS UNIDOS, 2016). Sua última atualização foi feita em 2016. O programa é baseado no *Cumulative Damage Factor* (CDF), que indica a quantidade de vida útil já consumida pelo pavimento, calculada pela somatória do número de carregamentos aplicados sobre o número de carregamentos permitidos para a ruína, para cada carga (BRILL, 2014), conforme a Equação 3:

$$CDF = \frac{\text{Número de Repetições da carga aplicada}}{\text{Número de Repetições Permitidas até a falha da estrutura}} \quad (3)$$

As cargas consideradas não são da aeronave de projeto, mas sim do *mix* completo de aeronaves (ESTADOS UNIDOS, 2016). Dessa forma, é possível considerar as características únicas de carregamento e posicionamento de trem de pouso de cada aeronave (VIEIRA, 2015). Como o CDF representa a fração de vida útil estrutural consumida pelo *mix* de aeronaves, quando o seu valor for igual a 1, o pavimento atingiu sua vida útil projetada (SHAFABAKHSH; KASHI, 2015), quando for menor que 1, ainda há vida útil remanescente. Um valor maior que 1 significa que o pavimento não atinge a previsão de vida útil de projeto e entrará em ruína.

Nesse contexto, o presente trabalho objetiva comparar as vantagens e desvantagens entre estruturas de pavimentos rígido e flexível para uso em pistas de pouso e decolagem de aeroportos.

2 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento desta pesquisa, realizou-se revisão da bibliografia sobre pistas de pouso e decolagem, e sobre os parâmetros necessários para realização de dimensionamento das estruturas de pavimentos para essa aplicação. O trabalho também incluiu o estudo do método de dimensionamento de pavimentos utilizado pela Federal Aviation Administration (ESTADOS UNIDOS, 2016) e dos parâmetros utilizados por esse método, a revisão bibliográfica das metodologias para o gerenciamento de pavimentos de pistas de pouso e decolagem, e para análise da vida útil quanto à fadiga desses pavimentos.

Além disso, realizou-se um estudo prático por meio do dimensionamento de uma estrutura em pavimento flexível e outra em pavimento rígido para uma mesma pista de pouso e decolagem; a partir delas, comparou-se a vida útil e os intervalos de manutenção necessários para ambos os pavimentos dimensionados, verificando, assim, qual seria a escolha mais adequada para o aeroporto brasileiro considerado no estudo.

3 PESQUISA PRÁTICA

Para o desenvolvimento da pesquisa prática foi realizado o dimensionamento das estruturas dos pavimentos rígido e flexível, considerando os dados de tráfego do aeroporto Internacional de São Paulo – André Franco Montoro, localizado em Guarulhos, São Paulo. Os dados foram obtidos por meio da planilha de registro de tráfego semanal, fornecida pela Anac (BRASIL, 2018).

3.1 Dimensionamento dos pavimentos

Para o dimensionamento dos dois tipos de pavimento, foi utilizado o método de dimensionamento por meio do *software* gratuito FAARFIELD (ESTADOS UNIDOS, 2016), disponível para *download* no *site* da FAA.

3.1.1 Dimensionamento com FAARFIELD

Ao iniciar o dimensionamento, foi necessário inserir o ISC, no caso da estrutura de pavimento flexível, ou o módulo k, no caso da estrutura de pavimento rígido. Em conjunto, foram inseridos os tipos de aeronaves, a quantidade de decolagem e o peso de decolagem de cada uma. Para Guarulhos, utilizamos o ISC de 8%, que, convertido pelo próprio *software* em módulo k, resultou em 82,74 MPa. Para a base de dados das aeronaves, foi utilizada a planilha do registro de serviços da Anac, extraída em 26 de junho de 2018. Essa planilha contém todos os pousos e as decolagens de uma semana de operação dos aeroportos administrados pela Anac, entre eles o de Guarulhos.

Para o dimensionamento, foi necessária uma base de dados anual e, por isso, utilizamos a semanal como base e multiplicamos pelo número de semanas em um ano, totalizando 48 semanas. Para inserir o peso de decolagem das aeronaves, pesquisou-se nos *sites* dos fabricantes de cada aeronave o peso máximo de decolagem e considerou-se 100% desse peso.

O *software* FAARFIELD apresenta algumas limitações de peso mínimo e máximo para cada aeronave, e não permite inserir mais de 100 mil decolagens por aeronave.

Ambos os dimensionamentos foram modelados com uma vida de projeto de 20 anos e estrutura padrão sugerida pela FAA. O *software* considera o índice CDF igual a um no final da vida útil, indicando a ruptura da estrutura, para calibrar o dimensionamento. Porém, no caso do pavimento flexível, é considerada somente a ruptura do subleito; enquanto para o rígido, é considerada somente a ruptura do revestimento.

O resultado do dimensionamento do pavimento flexível foi uma estrutura composta por quatro camadas, conforme o Quadro 1, sendo o subleito o próprio solo, e a sub-base em brita graduada simples com espessura de 621,3 mm. A base em concreto asfáltico usinado a quente com *binder* e espessura de 127 mm, e o revestimento em concreto asfáltico usinado a quente (CAP 50/70) com espessura de 101,6 mm, resultando em uma espessura total de 849,9 mm.

QUADRO 1

Dimensionamento do pavimento flexível.

Camada	Material	Espessura (mm)	Módulo (MPa)
Revestimento	Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAP 50/70)	101,6	1.378,95
Base	Concreto Asfáltico Usinado a Quente com <i>binder</i>	127	2.757,90
Sub-base	Brita Graduada Simples	621,3	527,77
Subleito	Solo (ISC = 8%)	0,00	82,74

Fonte: Elaborado pelos autores utilizando o FAARFIELD (2018).

O resultado do dimensionamento do pavimento rígido foi uma estrutura composta por quatro camadas, conforme o Quadro 1. Sendo o subleito o próprio solo, o reforço do subleito em brita graduada simples com espessura de 152,4 mm, a base em concreto compactado com rolo com espessura de 127 mm, e o revestimento em concreto de cimento *Portland* com espessura de 532 mm, resultando em uma espessura total de 811,1 mm.

QUADRO 2

Dimensionamento do pavimento rígido.

Camada	Material	Espessura (mm)	Módulo (MPa)
Revestimento	Concreto de Cimento Portland	532	27.579,03
Sub-base	Concreto Compactado com Rolo	127	4.826,33
Reforço do subleito	Brita Graduada Simples	152,4	234,79
Subleito	Solo (ISC = 8%)	0,00	82,74

Fonte: Elaborado pelos autores utilizando o FAARFIELD (2018).

3.2 Análise de vida útil

A análise de vida útil foi realizada em função do cálculo do CDF no ano designado, utilizando o módulo do *software* FAARFIELD para essa finalidade. Para uma análise coerente, foram utilizados os valores do CDF do revestimento a cada cinco anos até o final da vida útil, para ambas as estruturas de pavimentos analisadas (flexível e rígida). Para o pavimento flexível, o módulo do FAARFIELD indicou em seu resultado um aumento do CDF de 0,088 por ano.

De acordo com FAA (ESTADOS UNIDOS, 2016), se o índice CDF atingir o valor igual a um, significa que seu revestimento sofreu ruptura. No caso do revestimento do pavimento flexível, essa ocorrência foi verificada na idade de 12 anos, caso não sejam realizadas as intervenções necessárias ao pavimento. Para o pavimento rígido, a queda do índice CDF, conforme a Figura 1, é de 0,05 ao ano, indicando que o revestimento chegará ao estado de ruptura aos 20 anos.

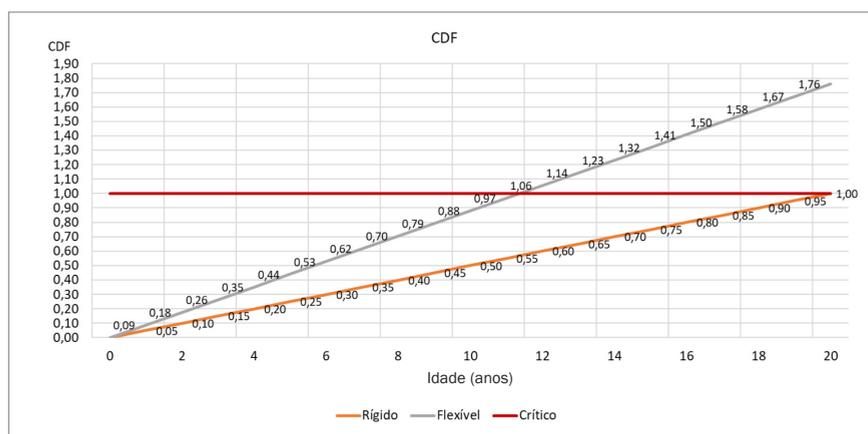


Figura 1 Gráfico da evolução do CDF.

Fonte: Elaborada pelos autores.

3.3 Modelo de desempenho

Para o estabelecimento de um sistema de gerenciamento, é necessário prever o desempenho do PCI de um pavimento aeroportuário. Ao utilizar o *software* da FAA – PAVEAIR – para essa finalidade, é necessário inserir dados de uma rede de pavimentos

com comportamento similar ao pavimento que se deseja gerenciar, para que seja possível modelar uma curva de desempenho.

Como não foi possível obter dados referentes a uma rede similar aos pavimentos dimensionados, o *software* não foi utilizado. Dessa forma, escolheu-se o modelo de desempenho proposto por Macedo (2005). O referido modelo foi desenvolvido com base em dados de uma rede de pavimentos da Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária (Infraero), coletados nos anos 1980, 1990, 1991, 1992, 1993, 1994 e 1998. Os dados somam 290 seções de alguns aeroportos espalhados pelo país.

Os modelos desenvolvidos por Macedo (2005) são apresentados nas equações 4 e 5, respectivamente para pavimentos flexíveis e rígidos.

$$PCI = 100 - 5,4957 * idade + 0,27885 * idade^2 - 0,00484 * idade^3 \quad (4)$$

$$PCI = 100 - 1,37659 * idade + 0,029598 * idade^2 + 0,00161 * idade^3 - 0,0000161 * idade^4 \quad (5)$$

A Figura 2 apresenta as curvas de cada modelo no intervalo de até 20 anos, que é o período estudado, visto que é a vida útil de projeto. É importante salientar que, para que o resultado indicado pela curva seja atendido, é necessária a realização das manutenções adequadas.

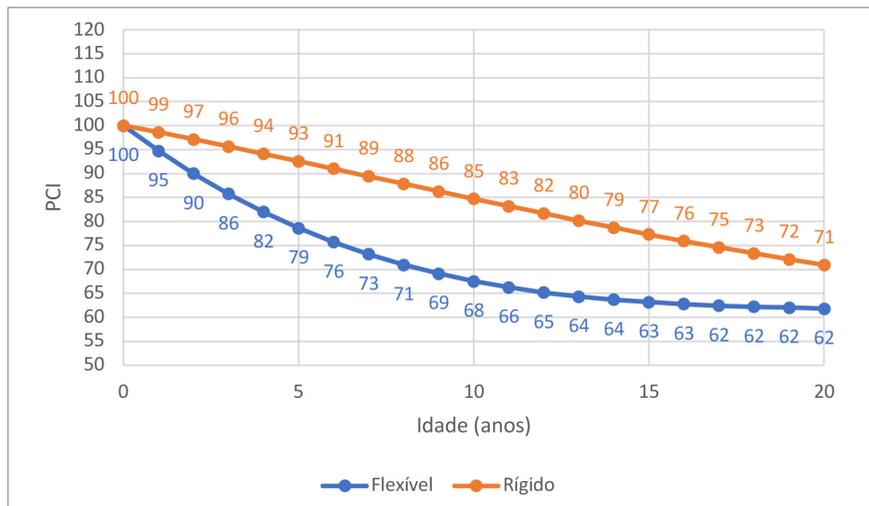


Figura 2 Curvas de desempenho.

Fonte: Macedo (2005).

3.4 Sistema de gerenciamento

Para desenvolver um sistema de gerenciamento, foi utilizada como estratégia de manutenção a sugestão dada por Macedo (2005), demonstrada no Quadro 3, cujo objetivo é manter o Índice de Condição de Pavimento (PCI) acima do nível crítico que, de acordo com a Anac (BRASIL, 2017), é de 70.

Como conservação de rotina foram consideradas intervenções como desobstrução de sistemas de drenagem, limpeza da pista, capina e manutenção. Como conservação localizada foram adotados remendos superficiais ou profundos, selagem de juntas e trincas, correção de depressões, exsudação de asfalto ou de escorregamento de massa, restritas a pequenas áreas do pavimento variando de 5% a 20% da área total. Para a conservação pesada, foram consideradas selagem de trincas, rejuvenescimento do revestimento asfáltico e proteção contra oxidação ou correção da resistência à derrapagem. Para as restaurações, foram considerados recapeamento simples ou recapeamento simples com remoção parcial da estrutura ou reconstrução total do pavimento.

QUADRO 3

Estratégias de manutenção,

Tipo de intervenção		PCI	Idade da estrutura (anos)	Idade do revestimento (anos)	Frequência (anos)
Reconstrução Total Do Pavimento (RRT)	Se	< 30	5	-	
	Ou se	< 20	-	-	
Recapeamento Simples Com Remoção Parcial Da Estrutura (RRP)	Se	20 < PCI < 30	> 5	> 15	
Recapeamento Simples (HR)	Se	20 < PCI < 30	> 5	15	
	Ou se	30 < PCI < 70	-	-	
Conservação Pesada (CP)	Se	> 70	-	> 10	5
Conservação Localizada (CL)	Se	> 70	-	(5-10)	3
Conservação de Rotina (CR)	Se	> 70	-	< 5	-

Fonte: Macedo (2005).

Macedo (2005) também desenvolveu uma relação entre os tipos de manutenções e o acréscimo de PCI que cada uma delas fornece ao pavimento, conforme apresentado no Quadro 4.

QUADRO 4

Acréscimo de PCI.

Tipo de Intervenção	Acréscimo de PCI
Reconstrução Total Do Pavimento (RRT)	100
Recapeamento Simples Com Remoção Parcial Da Estrutura (RRP)	100
Recapeamento Simples (HR)	100
Conservação Pesada (CP)	20
Conservação Localizada (CL)	10
Conservação de Rotina (CR)	0

Fonte: Macedo (2005).

Para simular o funcionamento da pista, foi aplicada a equação de desempenho também para as manutenções. Dessa forma, para o desenvolvimento das curvas foi somado o valor do PCI naquele ano (MACEDO, 2005) com o valor atual do acréscimo da manutenção.

O resultado da análise de desempenho dos pavimentos é apresentado na Figura 3:

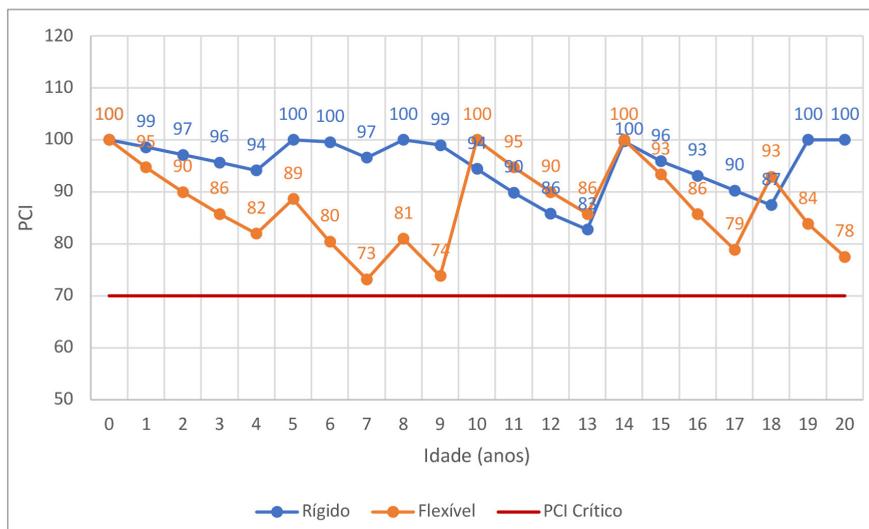


Figura 3 Curvas de desempenho dos pavimentos com aplicação de manutenção.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Para o pavimento rígido, foram realizadas duas conservações localizadas no quinto e no oitavo anos, e duas conservações pesadas no 14º e no 19º. Essas manutenções podem ser observadas na Figura 4 mediante o aumento do PCI.

Para o pavimento flexível, foram realizadas duas conservações localizadas no quinto e no oitavo anos, um recapeamento simples no décimo ano, e duas manutenções pesadas no 14º e 18º anos, que também podem ser observadas na Figura 4 com o acréscimo de PCI nesses anos a seguir.

3.5 Análise de custo

3.5.1 Custo de implantação

Os custos de implantação foram definidos com base nos custos unitários do DER do Estado de São Paulo, sua última atualização foi feita em setembro de 2018. Para o pavimento rígido o custo total de implantação é de R\$ 51.455.955,24. Enquanto para o pavimento flexível o custo seria de R\$49.686.537,78, baseado nos dados do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER) (SÃO PAULO, 2018).

3.5.2 Custo de manutenção

Para o cálculo do custo de manutenção, precificamos cada tipo de manutenção para cada tipo de pavimento. O custo da conservação de rotina, que se aplica aos dois tipos de pavimento, totaliza um valor de R\$ 1.820.065,20 por ano. Os custos desses itens foram feitos com base em dados do DER do Estado de São Paulo de 2018.

Para o cálculo da conservação localizada no caso do pavimento flexível, também foram utilizados os custos unitários do DER do Estado de São Paulo (SÃO PAULO, 2018), totalizando um custo de R\$ 685.125,00 para intervenções em 5% da área da pista; um total de R\$ 1.370.250,00 para intervenção em 10% da área da pista; e R\$ 2.740.500,00 para intervenção em 20% da área da pista.

Esse tipo de conservação foi precificado de acordo com a porcentagem da área de intervenção. Para o caso deste estudo, como são realizadas duas manutenções localizadas, uma aos cinco anos e outra aos oito anos, considerou-se que a primeira seria em 5% da área da pista e a segunda em 10%. Ao passo que, para o pavimento rígido, foi utilizado o valor de 4% do custo de construção, já que se trata apenas da manutenção das juntas das placas (MEZZOMO, 2014), resultando um custo de R\$ 2.058.238,21.

Para a manutenção pesada, no caso do pavimento flexível, foi utilizada a composição de preços do DER (SÃO PAULO, 2018), resultando em um valor de R\$ 4.698.000,00. Para o pavimento rígido, foi utilizado o valor do serviço de recomposição de placa de concreto, de acordo com o SICRO de 2 de setembro de 2016, com os devidos ajustes monetários, resultando em um valor de R\$ 10.629.072,72.

Como somente no pavimento flexível foi necessária a realização de restauração, não foi calculado o preço desse tipo de manutenção para o rígido. O cálculo do custo de restauração também foi baseado na composição de custos unitários do DER (SÃO PAULO, 2018), resultando em R\$ 15.290.100,00.

O custo total previsto para manter o pavimento rígido durante os 20 anos foi de R\$ 32.654.882,66, e para a manutenção do pavimento flexível foi de R\$ 34.021.735,80. A diferença entre esses valores é de R\$ 1.366.853,14, o que indica que, quanto à manutenção, o pavimento flexível é 4% mais caro do que o rígido. Os gastos distribuídos por ano podem ser vistos na Figura 4:

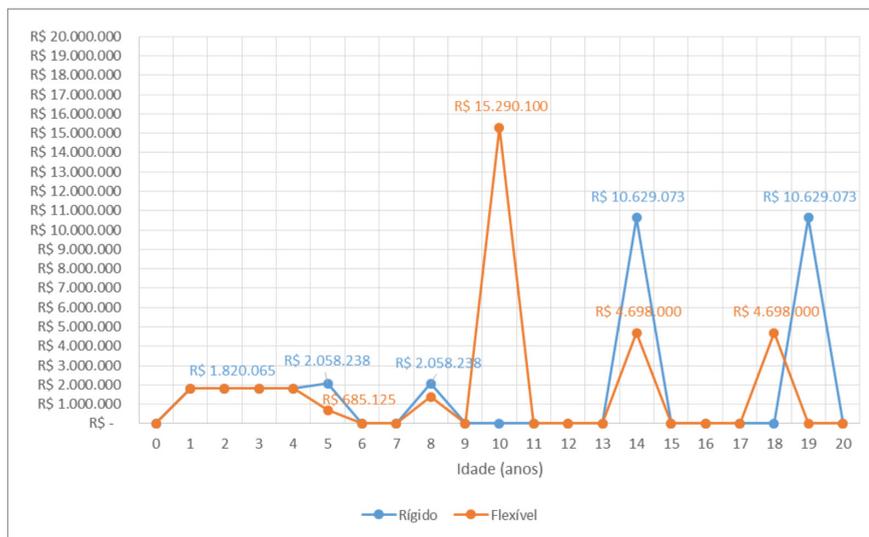


Figura 4 Custos de manutenção.

Fonte: Elaborada pelos autores.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da vida útil dos revestimentos dos pavimentos, realizada por meio dos resultados do índice CDF de cada revestimento, obtidos com o uso do *software* FAARFIELD, possibilitou observar grandes diferenças no comportamento de cada tipo de pavimento estudado ao longo dos anos. O fim da vida útil de cada um deles ocorre, conforme exposto, quando esse o CDF atinge valor igual ou superior a um, indicando a ruptura.

Para o pavimento rígido, o valor de ruptura do revestimento foi atingido ao final da vida útil, ou seja, em seu vigésimo ano. Em contrapartida, no pavimento flexível, a ruptura do revestimento ocorreu aos 12 anos, com o CDF atingindo o valor de um. Ao final dos 20 anos, caso não sejam realizadas as intervenções necessárias, o CDF chegaria a um valor de 1,76 para o revestimento e de 1 para a estrutura, indicando o total colapso do pavimento. Em função desses resultados, o pavimento rígido possui uma vida útil maior que a do pavimento flexível.

As curvas de desempenho apresentadas por Macedo (2005) mostram que cada pavimento atingirá PCI igual a 70, considerado crítico, em momentos distintos. No caso do pavimento rígido, ao final de 20 anos de vida de projeto, há ocorrência de um valor de 71 de PCI. Para o pavimento flexível, o valor mais baixo de PCI apresentado foi de 69 no nono ano. Aos 20 anos, final de sua vida útil, o pavimento atingirá PCI de 62, demonstrando que o pavimento flexível precisa receber intervenções com mais frequência e mais cedo, em relação ao pavimento rígido; corroborando que a vida útil do pavimento rígido será maior que a do flexível.

Quanto ao gerenciamento de pavimentos, ao aplicar a mesma estratégia sugerida por Macedo (2005) para os dois tipos de pavimentos, verificou-se que o pavimento flexível, ao longo dos seus 20 anos, necessitará de mais intervenções que o rígido. Por exemplo, o rígido, ao longo dos 20 anos, sofrerá quatro conservações de rotina, duas localizadas e duas pesadas. Em contrapartida, o pavimento flexível sofrerá quatro conservações de rotina, duas localizadas, duas pesadas, além de uma restauração; o que é coerente, levando em conta a análise de vida útil que indica a maior durabilidade do pavimento rígido.

A comparação entre os custos de implantação de cada pavimento mostrou uma economia no uso do pavimento flexível, totalizando R\$ 1.769.417,46. Esse valor mostra uma economia de 3,4% em relação ao custo do rígido. Quanto ao custo de manutenção, o pavimento rígido apresenta uma economia de R\$ 1.366.853,14, o que representa uma vantagem de 4% em relação ao custo da manutenção do pavimento flexível. Dessa forma, quanto ao custo total, o pavimento flexível apresenta uma economia de R\$ 402.564,32. Em comparação, o pavimento rígido apresenta uma diferença de menos de 1%.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados apresentados indicam que a escolha do pavimento rígido para pistas de pouso e decolagem analisada é mais adequada, pois essa estrutura apresentará vida útil maior em relação ao pavimento flexível, com menos necessidade de intervenções ao longo do tempo, conforme demonstrado pela estratégia de manutenção aplicada para ambos os pavimentos. Para a pista do aeroporto analisado, verificou-se uma economia no custo total do pavimento flexível em relação ao pavimento rígido, porém é de menos 1%, não sendo expressiva.

Após esses resultados, ainda é preciso entender o motivo da popularização do uso do pavimento flexível para pistas de pouso e decolagem no Brasil, sendo o estudo das

técnicas executivas e suas dificuldades, assim como as técnicas de manutenção, uma possível alternativa para investigar a causa da popularização.

APPLICATION OF RIGID PAVEMENTS IN RUNWAYS

Abstract

This article shows a comparison between flexible pavement and rigid pavement for use in runways. The authors compared them by designing a landing and takeoff runway for the Guarulhos airport, in rigid and flexible pavement, using the FAARFIELD software. A life and performance analysis for each lane was sized using FAARFIELD and establishing a performance model. The results developed a maintenance strategy and a management system for each type of pavement. Finally, a comparative cost analysis was made for each alternative. It was possible to demonstrate greater durability in the case of rigid pavement, less need for intervention.

Keywords: Airports. Performance Analysis. Design.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 9719: Aeroportos: Parque de abastecimento de aeronaves*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1997.

BARROS, R. L. *Gestão da Conservação de Pavimentos de Aeroportos e Aeródromos*. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Coimbra, Coimbra, 2008. Disponível em: <https://www.engenhariacivil.com/gestao-conservacao-pavimentos-aeroportos-aerodromos>. Acesso em: 8 abr. 2018.

BRASIL. Agência Nacional de Aviação Civil (Anac). *Registro de Tráfego*. São Paulo: Agência Nacional de Aviação Civil, 2018.

BRASIL. Agência Nacional de Aviação Civil (Anac). *Manual de Sistema de Gerenciamento de Pavimentos Aeroportuários*. São Paulo: Agência Nacional de Aviação Civil, 2017.

BRILL, D. R. *FAA 40 – Administration -Year Life Pavement Extension R&D*. Santiago: Federal Aviation Administration, 2014. Disponível em: https://www.icao.int/SAM/Documents/2014-ALACPA11/DIA 3 - 5_Research on 40-Year Life Pavement Extension - Copy.pdf. Acesso em: 14 abr. 2018.

CEMENT CONCRETE & AGGREGATES AUSTRALIA (Australia). *Airport Concrete Runways*. 2014. Disponível em: http://www.ccaa.com.au/iMIS_Prod/CCAA/Public_Content/RESOURCES/Case_Studies/Concrete_Airport_Runways.aspx?WebsiteKey=4998d6ce-2791-4962-b1e2-6b717f54a8d3. Acesso em: 1º abr. 2018.

DURÁN, J. B. C.; FERNANDES, J. L. Avaliação do método PCI e do programa PAVEAIR para a gerência de pavimentos aeroportuários. In: EXPOPAVIMENTAÇÃO, 4., Foz do Iguaçu, 2015. *Anais* [...]. Foz do Iguaçu, Paraná: ABDER, 2015. Disponível em: www.sinicesp.com.br/44rapv/trabalhos/TrabalhoFinal_109.pdf. Acesso em: 1º maio 2018.

ESTADOS UNIDOS. *AC 150/5320-6F: Airport Pavement Design and Evaluation*. Washington, DC: Federal Aviation Administration, 2016. Disponível em: https://www.faa.gov/airports/resources/advisory_circulars/index.cfm/go/document.current/documentNumber/150_5320-6. Acesso em: 2 out. 2018.

HEN, X. *Life-Cycle Assessment of Airport Pavement Design Alternatives for Energy and Environmental Impacts*. Hampton: Airport Cooperative Research Program (ACRP) University Design Competition, 2017.

HENRIQUE, Y. F. *Método de avaliação de pavimentos aeroportuários*. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

MACEDO, M. de C. *Estudo para a Base Técnica de um Sistema de Gerência de Pavimentos para Redes Regionais de Aeroportos*. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2005.

MARTINS, G. de A. *Estudo estrutural duma pista duma infraestrutura aeroportuária*. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia da Construção) – Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, São Paulo, 2017. Disponível em: https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/14921/1/GABRIEL_DE_ARAÚJO_MARTINS.pdf. Acesso em: 1º abr. 2018.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. *Mecânica dos pavimentos*. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 2005.

MERIGHI, L. F. *Avaliação funcional de pavimentos asfálticos aeroportuários com a finalidade de estabelecer metas para sua manutenção*. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

MEZZOMO, H. *Análise comparativa entre um pavimento de concreto simples e um flexível para a duplicação da rodovia BR-386/RS*. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário Univates, Lajeado, 2014.

MINNESOTA ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION. *Asphalt is the top choice for airport runway pavements: fast facts*. 2014. Disponível em: <http://www.asphaltisbest.com/wp-content/uploads/2014/02/Asphalt-is-the-Top-Choice-for-Airport-Runway-Pavements-Fast-Facts.pdf>. Acesso em: 1º set. 2021.

MIRANDA, U. S. *Dimensionamento de pavimentos flexíveis de aeroportos: aplicações do método da FAA*. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, 2015. Disponível em: <http://www.ccet.ueg.br/biblioteca/>

Arquivos/monografias/DIMENSIONAMENTO_DE_PAVIMENTOS_FLEXIVEIS_DE_AEROPORTOS_APLICACOES_DO_METODO_DA_FAA.pdf. Acesso em: 1º maio 2018.

NECKEL, G. *Dimensionamento e análise numérica de estruturas de pavimento asfáltico aeroportuário*. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2017.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (Canadá). International Civil Aviation Organization. *Aerodrome Design Manual*. 3. ed. Canadá: International Civil Aviation Organization, 2006.

RAMOS, B. A. S. *et al.* Aplicação de métodos de dimensionamento de pavimentos aeroportuários da FAA ao Aeroporto Internacional Presidente Juscelino Kubitschek. *Revista Transportes*, v. 25, n. 4, p. 1-57, 30 dez. 2017.

SÃO PAULO (Estado). *Composição de Custos Unitários*. São Paulo: Departamento de Estradas de Rodagem, 2018.

SÃO PAULO (Estado). *Sistema de Custos Referenciais de Obras 2*. São Paulo: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2016.

SHAFABAKHSH, G. A.; KASHI, E. Effect of Aircraft Wheel Load and Configuration on Runway Damages. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, v. 59, n. 1, p. 85-94, 2015. DOI:10.3311/ppci.2103

VIEIRA, R. A. C. *Dimensionamentos de pavimentos aeroportuários: a consideração de novas orientações*. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Lisboa, Lisboa, 2015. Disponível em: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1126295043834952/62975.pdf>. Acesso em: 29 abr. 2018.

YOUNG, S. B. *Aeroporos: planejamento e gestão*. 6. ed. Nova York: Bookman, 2014.

Contato

Aline Antunes Rodrigues
aar.aline96@gmail.com

Tramitação

Recebido em novembro de 2019.
Aprovado em junho de 2021.