ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO *SOFTWARE* FAARFIELD NOS RESULTADOS DE VIDA ÚTIL DE PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS

Mateus do Nascimento Lira
Universidade Federal do Ceará
Rua Professor Armando Farias 703 – Pici, 60020-181, Fortaleza/CE, +55 85 3366-9488
liramateus@det.ufc.br

Francisco Heber Lacerda de Oliveira
Universidade Federal do Ceará
Rua Professor Armando Farias 703 – Pici, 60020-181, Fortaleza/CE, +55 85 3366-9488
heber@det.ufc.br

RESUMO

Este artigo objetiva estudar a influência das espessuras das camadas de base e de sub-base, bem como do volume de tráfego, nos resultados de vida útil de pavimentos aeroportuários fornecidos pelo *software* FAARFIELD. A análise de sensibilidade dos dados foi realizada com os *mixes* de aeronaves em aeroportos de porte pequeno, médio, muito grande e de mega internacional, combinando diferentes espessuras de base, sub-base, revestimento e capacidade de suporte do subleito da pista de pouso e decolagem. Os resultados mostram que os a vida útil varia numa amplitude menor conforme se aumenta o volume de tráfego.

Keywords: FAARFIELD, Análise, Sensibilidade, Pavimento, Aeroportuário.

ABSTRACT

This paper aims to study the influence of base and sub-base thicknesses, and traffic volume in the life cycle results given by FAARFIELD. The sensibility analysis of the data was made using mixes from small, medium, very big and mega airports, combining different base and sub-base thicknesses and keeping constant the surface course thickness and the subgrade strength. The results show that FAARFIELD life cycle data become less sensible when the traffic volume increases.

Keywords: FAARFIELD, Analysis, Sensibility, Pavement, Airport.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil passa, desde 2011, por fase de intensa mudança em seu cenário aeroportuário, promovida pelas concessões de aeroportos. Essa mudança acontece não apenas no modelo do sistema de gestão, mas também nas características físicas dos sítios aeroportuários, uma vez que o Estado, para realizar a concessão, exige planos de manutenção, readequação ou expansão das estruturas existentes.

Entre as modificações da parte física dos sítios, podem ser citadas as atividades de reforço ou construção/reconstrução de pistas de pouso e decolagem e de *taxiways*. Segundo Taffe Júnior (2002), projetos de pavimentos novos ou restauração de pavimentos deteriorados, no Brasil, se fundamentam principalmente no método proposto pela *Federal Aviation Administration* (FAA).

Essa metodologia era, inicialmente, empírica, e consistia em ábacos que se fundamentavam no Método *California Bearing Ratio* (CBR) de dimensionamento e na consideração de uma aeronave de projeto. Em 2009, porém, a FAA remodelou completamente o método, passando a utilizar um *software* baseado em camadas elásticas (para pavimentos flexíveis), método dos elementos finitos (para pavimentos rígidos) e análise de dano acumulado para determinar as dimensões das estruturas de pavimentos aeroportuários (RAMOS, 2016).

O *software* da FAA, denominado FAARFIELD (*Federal Aviation Administration Rigid and Flexible Iterative Elastic Layered Design*), vem sendo usado desde então, e é hoje uma das principais ferramentas utilizadas para projeto de pavimentos aeroportuários.

A utilização do FAARFIELD resulta em dados que requerem senso crítico do projetista para decidir entre aceitá-los ou realizar uma nova simulação, resultados esses que apresentam, muitas vezes, grandes diferenças a partir de pequenas modificações dos dados de entrada. Essa sensibilidade dos *outputs* será o foco do presente trabalho, dada a relevância da compreensão do comportamento dos resultados do *software* para uma correta análise dos dados e seu adequado emprego na concepção de projetos de pavimentos aeroportuários.

Este artigo está dividido em cinco seções: além desta introdução, a Revisão Bibliográfica aborda o estudo da sensibilidade de resultados obtidos a partir do uso de *softwares*; o Método de Pesquisa, apresenta os procedimentos utilizados na obtenção dos resultados apresentados neste trabalho; a Discussão dos Resultados contém uma apresentação dos resultados obtidos, bem como traz uma discussão dos mesmos; nas Conclusões apresentam-se as principais constatações feitas a partir dos resultados obtidos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Existem três métodos de dimensionamento de pavimentos, segundo Balbo (2007): o empírico, que consiste na modelagem estatística a partir de parâmetros físicos observados nos pavimentos em serviço; o semi-empírico, resultado de uma extrapolação dos resultados empíricos através de uma teoria analítica; e o empírico-mecanicista, como uma calibração de modelos teóricos com uma base de dados obtidos em campo e em laboratório. A tendência atual é a adoção do método empírico-mecanicista inserido em ferramentas computacionais para o dimensionamento de pavimentos, tanto rodoviários quanto aeroportuários.

Para os pavimentos aeroportuários, a FAA tem destaque na regulação de metodologias de dimensionamento. FAA (1995) regulamentava o dimensionamento através do método empírico, baseado em ábacos que cruzavam informações de CBR do subleito e do estabelecimento de uma aeronave crítica. Anos depois, FAA (2009) substituiu sua metodologia empírica por uma empírico-mecanicista, que estabelecia o uso de uma ferramenta computacional no dimensionamento do pavimento. O *software*, chamado FAARFIELD, utiliza a teoria de camadas elásticas, método dos elementos finitos e análise de dano acumulado para promover o dimensionamento das estruturas, e é utilizado no Brasil em projeto de implantação de pavimentos aeroportuários, bem como em projetos de recuperação dos pavimentos de pistas antigas (RAMOS, 2016).

Para que se diminuam os custos com recuperação e manutenção de pavimentos, é necessária a determinação correta de condições de subleito, espessuras de camadas da estrutura e de condições de volume de tráfego. Para unir todas essas variáveis na análise, estão disponíveis

várias ferramentas computacionais de auxílio no dimensionamento de pavimentos. No entanto, não fica clara para o usuário a forma como cada parâmetro de entrada influencia nas espessuras finais do revestimento, o que torna necessário o estudo e a identificação dos *inputs* críticos através de análises de sensibilidade (PURVIS, 2013).

A sensibilidade de programas computacionais foi testada por Purvis (2013) em aplicação de dados de vias pavimentadas do estado americano de Iowa em diferentes *softwares* de dimensionamento de pavimentos rodoviários. No estudo, realizado com pavimentos rígidos e flexíveis, foi constatada maior sensibilidade das espessuras de camada calculadas pelos programas às variações de tráfego do que às mudanças de capacidade resistente do subleito. A pesquisa constatou, ainda, que em alguns casos as espessuras das camadas de pavimentos flexíveis são mais sensíveis às mudanças em tráfegos leves do que àquelas promovidas em tráfegos pesados.

No âmbito de pavimentos aeroportuários, a sensibilidade de dados a partir do uso de *softwares* também foi estudada. Garg *et. al.* (2004) estudaram a influência do CBR, da espessura do revestimento, da espessura da camada de base e do peso bruto das aeronaves na vida útil dos pavimentos aeroportuários através do uso do *software* LEDFAA 1.3 (*Leyered Elastic Design Federal Aviation Administration*), desenvolvido pela FAA e precursor do FAARFIELD. No estudo, os autores constataram que a espessura da base e o peso das aeronaves como parâmetros de maior influência nos resultados, tendo sido apresentada maior sensibilidade ao peso bruto das aeronaves.

3. MÉTODO DE PESQUISA

O método proposto por este artigo para analisar a sensibilidade do *software* FAARFIELD é a geração de resultados de vida útil, a partir do uso do programa, para condições distintas de *mixes* de aeronaves, portes de aeroporto e espessuras de camadas de base e sub-base.

Os aeroportos cujos *mixes* são utilizados nas análises deste trabalho foram escolhidos de modo a se abrangerem equipamentos de diferentes portes: (i) Aeroporto Regional do Cariri, em Juazeiro do Norte/CE (dados do ano de 2018), aeroporto regional de pequeno porte; (ii) Aeroporto Internacional de Fortaleza/CE (dados do ano de 2016) como aeroporto internacional de médio porte; (iii) Aeroporto Internacional de Guarulhos/SP (dados do ano de 2011) como aeroporto internacional de porte muito grande; (iv) Aeroporto de Atlanta/EUA (dados do ano de 2011) como mega aeroporto. A definição do porte de cada aeroporto usado foi realizada a partir da classificação proposta por OAG Aviation Worldwide Limited (2018), que apresenta essa avaliação pelo total anual de passageiros em aeroportos internacionais, dividindo-os em cinco escalas: aeroporto internacional pequeno (2,5 a 5 mi de passageiros), aeroporto internacional médio (5 a 10 mi de passageiros), aeroporto internacional grande (10 a 20 mi de passageiros), aeroporto internacional muito grande (20 a 30 mi de passageiros) e mega aeroporto internacional (mais de 30 mi de passageiros).

Os modelos de aeronaves considerados para compor cada um dos *mixes* foram definidos como aqueles que tivessem mais de 13.620 kg de peso e que perfizessem mais de 0,1% do total de operações de decolagem dos respectivos aeroportos. Não foram considerados modelos monomotores, pequenos bimotores ou pequenos jatos, por entender-se que o seu pequeno peso não proporcionaria diferenças consideráveis nos resultados de vida útil, uma vez que causam pouco dano à estrutura das pistas. Os *mixes* utilizados estão apresentados nas Tabelas 1 a 4.

Tabela 1: *Mix* do Aeroporto Regional do Cariri em 2018 (INFRAERO, 2019).

Aeronave	Decolagens anuais
A319-100	89
E190-100	103
B737-800	179
B737-700	220
E190-200	271
A320-200	920

Tabela 2: *Mix* do Aeroporto Internacional de Fortaleza em 2016 (INFRAERO, 2017).

Aeronave	Decolagens anuais	*Aeronave*	Decolagens anuais
B757-200	54	B737-700	504
E190-100	70	ATR-72-212	1.187
B767-300	205	E190-200	2.091
A319-100	247	A321-200	4.297
A330-200	306	A320-200	4.769
B737-400	370	B737-800	6.099

Tabela 3: *Mix* do Aeroporto Internacional de Guarulhos em 2011 (INFRAERO. 2014)

Aeronave	Decolagens anuais	*Aeronave*	Decolagens anuais
B747-300	144	B747-500	1.584
MD-11	144	B777-300	1.680
A330-300	336	B767-300	3.936
B767-400	336	A321-100	4.032
B767-200	672	B777-200	4.416
A319-100	720	A330-200	5.472
B737-600	1.021	B737-700	6.336
B747-400	1.098	B737-300	7.536
B747-400	1.104	B737-800	19.248
B727-200	1.200	A320-200	27.360
A340-300	1.584		

A versão do *software* utilizada neste trabalho foi a FAARFIELD v 1.42. Para fazer o dimensionamento de uma estrutura, o programa necessita como *inputs*: *mix*, espessura do revestimento, CBR do subleito e quantidade e materiais das camadas. Optou-se por adotarem-se os materiais de uma estrutura padrão do FAARFIELD, conforme ilustrado na Figura 1, que esquematiza as camadas das estruturas com os materiais utilizados. A primeira camada consiste em um revestimento asfáltico, a segunda, uma base estabilizada e a terceira, uma sub-base de brita graduada simples. O programa permite ainda que o usuário forneça as espessuras das camadas de base e sub-base como *input*, sendo 125 mm e 150 mm seus valores mínimos, respectivamente.

Tabela 4: *Mix* do Aeroporto Internacional de Atlanta em 2011 (KB ENVIRONMENTAL SCIENCES, 2014).

Aeronave	Decolagens anuais	*Aeronave*	Decolagens anuais
B757-200	365	MD-82	2191
DC-10-30	365	B767-400	2192
DC-8	365	B777-200	2192
A340-200	365	B757-300	2920
B747-200	730	E190-200	4380
A300-B4	730	A319-100	9490
B727-200	730	B767-300	11317
MD-11	730	A320-200	12412
DC-10-10	1095	DC-9	13139
B737-500	1095	B737-800	20805
B747-400	1460	B737-700	28470
Saab 340A	1460	Bombardier CRJ-900-ER	51098
MD-90	1461	B757-200	59494
A330-300	2191	MD-83	79932

Uma vez que o *software* calcula automaticamente as espessuras das camadas de base e sub-base para atender a vida de projeto, definida pelos autores como sendo de 20 anos, e de modo a tornar possível a comparação de resultados de *mixes* diferentes, optou-se por adotarem-se os mesmos valores para a espessura do revestimento e para o CBR do subleito das estruturas dos quatro aeroportos, iguais a 130 mm e 12%, respectivamente.

Depois de inseridos os quatro *mixes*, o programa realizou o dimensionamento da estrutura referente ao pavimento de cada um dos aeroportos, gerando valores para as camadas de base e sub-base. A partir desses resultados, estabeleceram-se as espessuras que seriam utilizadas nas análises de tempo de vida útil. Tais análises consistem em comparar valores de vida útil fornecidos pelo FAARFIELD a partir de combinações de espessuras de base e sub-base, sempre mantendo constantes os valores de espessura de revestimento, CBR do subleito e materiais das camadas.

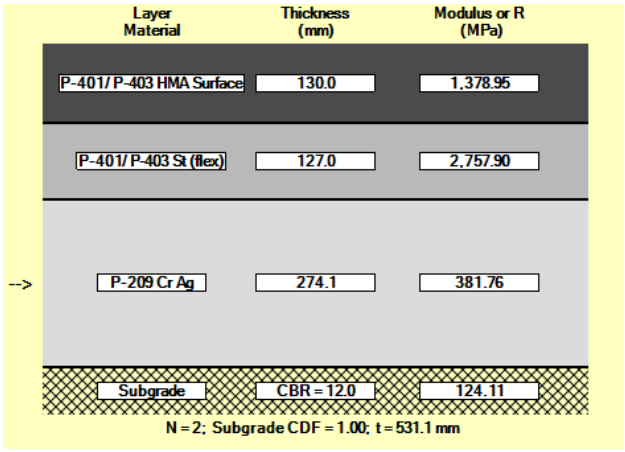


Figura 1: Esquema da estrutura projetada no FAARFIELD.

Nas combinações, determinou-se que a base assumiria valores entre 125 mm e 280 mm, variando em acréscimos de 5 mm. Para a sub-base, o valor calculado pelo FAARFIELD foi aproximado para o múltiplo de 5 mais próximo. Os valores assumidos pela sub-base nas combinações variaram 20 mm para mais e 20 mm para menos do valor corrigido, também variando em intervalos de 5 mm.

Os resultados calculados pelo *software* para a vida útil foram organizados em tabelas e analisados quanto à sensibilidade deles em relação à proporção da mudança nos dados de entrada. Essa sensibilidade foi obtida na forma de porcentagens calculadas entre os valores anteriores e posteriores à mudança nas variáveis avaliadas em cada momento, sendo essa a forma de análise adotada neste trabalho.

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Inicialmente, foram inseridos os dados de entrada para que o programa calculasse as espessuras das camadas para uma vida útil de 20 anos. Os resultados fornecidos pelo *software* para cada um dos aeroportos estão representados na Tabela 5.

Da Tabela 5, podem-se observar dois aspectos relevantes. O primeiro é o fato de o programa calcular sempre a mesma espessura para a camada de base, independente do porte do aeroporto. Conforme explicado por Ramos (2016), isso se observa porque todos os *mixes* possuem aeronaves que ultrapassam os 45.400 kg de peso, ocasião em que passa a ser de 127 mm a espessura mínima da camada de base.

Tabela 5: Espessuras das camadas calculadas pelo FAARFIELD.

Aeroporto	*Revestimento (mm)*	*Base (mm)*	*Sub-base (mm)*
Regional do Cariri	130	127	162,6
Internacional de Fortaleza	130	127	274,2
Internacional de Guarulhos	130	127	349,1
Internacional de Atlanta	130	127	333,3

O segundo, é que a espessura da camada de sub-base é maior para o Aeroporto Internacional de Guarulhos do que para o de Atlanta, mesmo esse último tendo quase 224 mil operações a mais consideradas no *mix* utilizado e apesar de as aeronaves presentes em ambos os *mixes* serem, em sua maioria, as mesmas.

A existência de muitas operações de aeronaves com menor peso ou que aplicassem menores pressões por pneu no *mix* de Atlanta, ou, ainda, a presença de aeronaves maior porte, que possuíssem maior afastamento entre pneus do trem de pouso principal, diminuindo, assim, o tamanho da zona de interferência dos bulbos de tensões criados pelas rodas, poderiam explicar a menor dimensão sugerida pelo FAARFIELD para a espessura da sub-base do Aeroporto Internacional de Atlanta. No entanto, sendo a maioria dos modelos de aeronaves iguais, e existindo muito mais operações no Aeroporto de Internacional Atlanta, os autores não identificam nenhum outro fator contribuinte que possa ter acarretado essa divergência nos resultados do programa.

Após ajuste dos valores de espessura de sub-base fornecidos pelo *software*, obtêm-se as seguintes espessuras, conforme ordem dos aeroportos listados na Tabela 5, a serem utilizadas para definir os intervalos das simulações de tempo de vida útil: 170 mm, 270 mm, 350 mm e 330 mm. Adotou-se o valor de 170 mm para o Aeroporto Regional do Cariri porque, caso se adotassem os valores 160 mm ou 165 mm, a variação de 20 mm para menos ficaria abaixo do valor mínimo para a camada de sub-base permitida pelo FAARFIELD, que é de 150

mm. Os intervalos de espessuras de base e sub-base utilizados estão representados na Tabela 6.

A Tabela 7 apresenta os resultados de vida útil de projeto, em anos, obtidos a partir das simulações com as diferentes combinações de espessuras de camadas para o Aeroporto Regional do Cariri. Foram geradas tabelas similares para os demais aeroportos, porém, não serão apresentadas neste trabalho devido à grande quantidade de dados que contêm.

Tabela 6: Intervalos de valores de base e sub-base utilizados nos cálculos de tempo de vida útil.

Aeroporto	***Base (mm)***	***Sub-base (mm)***
Regional do Cariri	125 a 280	150 a 190
Internacional de Fortaleza		255 a 295
Internacional de Guarulhos		330 a 370
Internacional de Atlanta		310 a 350

Tabela 7: Valores de vida útil de projeto para o Aeroporto Regional do Cariri (em anos).

	Espessura da sub-base (mm)								
Espessura da base (mm)	**190**	**185**	**180**	**175**	**170**	**165**	**160**	**155**	**150**
280	14724930	14782920	14841440	14900530	14690160	15020360	15082740	15151910	15223110
275	14782920	14841440	14900530	14960160	15020360	15082740	15151910	15223110	15295060
270	14841440	14900530	14960160	15020360	15082740	15151910	15223110	15295060	15372380
265	14900530	14960160	15020360	15082740	15151910	15223110	15295060	15372380	15452030
260	14960160	15020360	15082740	15151910	15223110	15295060	15372380	15452030	15533000
255	15020360	15082740	15151910	15223110	15295060	15372380	15452030	15533000	15619570
250	15082740	15151910	15223110	15295060	15372380	15452030	15533000	15619570	15707200
245	15151910	15223110	15295060	15372380	15452030	15533000	15619570	15707200	**15795910**
240	15223110	15295060	15372380	15452030	15533000	15619570	15707200	**15795910**	15885710
235	15295060	15372380	15452030	15533000	15619570	15707200	**15795910**	15885710	15976640
230	15372380	15452030	15533000	15619570	15707200	**15795910**	15885710	15976640	16068700
225	15452030	15533000	15619570	15707200	**15795910**	15885710	15976640	16068700	16161920
220	15533000	15619570	15707200	**15795910**	15885710	15976640	16068700	16161920	15859640
215	15619570	15707200	**15795910**	15885710	15976640	16068700	15366200	12538550	8984069
210	15707200	**15795910**	15885710	15976640	14925550	11854670	8216068	5104375	2669659
205	**15795910**	15885710	14575700	11311270	7657401	4630883	2385914	1206713	608070
200	14338040	10995430	7280745	4312609	2203593	1107571	572271.7	296467	158924.9
195	7063209	4119122	2097216	1047399	238162.4	285883.1	152442.3	84569.8	48847.7
190	2048885	1017918	519781.4	274499.1	149723.4	82317.3	47151.1	27931.7	17100.8
185	514536	269939.7	146685.7	81836.6	46464.3	27308.5	16590.9	10413.9	6735
180	146441.2	81834.6	46666	27203	16394	10213.4	6559.1	4330.6	2932.8
175	47485.3	27571.6	16475.1	10183.5	6492.3	4257.4	2864.7	1973.5	1389.3
170	16820	10310.6	6523.1	4247.4	2839	1943.7	1360.3	971.4	706.7
165	6646.7	4295.7	2851.6	1939.8	1349.4	958.1	693.3	510.4	381.9
160	2900.4	1959.8	1354.8	956.3	688.2	504	375.2	283.6	217.4
155	1375.8	965.3	690.6	503.1	372.7	280.3	213.9	165.4	129.4
150	700.3	507.4	373.9	279.8	212.5	163.5	127.5	100.5	80.1
145	378.6	281.9	213.1	163.3	126.7	99.5	79	63.4	51.3
140	215.5	164.4	127	99.3	78.5	62.7	50.6	41.3	33.9
135	128.3	99.9	78.7	62.6	50.4	40.9	33.5	27.6	23
130	79.4	63	50.4	40.8	33.3	27.4	22.7	19	16
125	50.9	41	33.3	27.3	22.6	18.8	15.8	13.4	11.4

Observando os dados da Tabela 7, uma análise inicial ressalta a extensão da amplitude dos valores: as vidas úteis vão de dezenas de milhões de anos na parte superior a pouco mais de 10 anos na parte inferior da tabela. O Aeroporto Regional do Cariri apresenta, entre os quatro estudados, os maiores valores de vida útil, uma vez que ele apresenta o *mix* mais leve e com menor número de operações (as suas operações correspondem a 8,6%, 1,9% e 0,6% das operações dos *mixes* considerados para os aeroportos de Fortaleza, Guarulhos e Atlanta, respectivamente). Se calculada a diferença entre o maior e o menor valor de vida útil gerados pelo FAARFIELD para cada um dos aeroportos, encontram-se acréscimos de 141.770.000%, 17.550.000%, 4.650.000% e 1.685.000% para os aeroportos do Cariri, de Fortaleza, de Guarulhos e de Atlanta, respectivamente.

Esses números confirmam que, conforme o *mix* possua aeronaves mais pesadas e com maior número de operações, a amplitude dos dados diminui. Isso é devido à queda de vida útil apresentada pela estrutura quando ela recebe a ação de um tráfego mais pesado e intenso. Quanto maior o volume de tráfego atuante na estrutura, maior o dano sofrido pela mesma, o que a leva a apresentar valores de vida útil menor.

Uma análise dos dados na Tabela 7 mostra que alguns valores se repetem na sua diagonal, de forma ascendente (os valores a partir da linha de espessura de base igual a 205 mm foram destacados para evidenciar esse fato). Todos os valores acima da linha diagonal destacada também se repetem nas diagonais, bem como alguns dados abaixo. Esses valores de vida útil iguais correspondem exatamente a iguais espessuras totais da estrutura do pavimento. Por exemplo, em todas as células da linha de dados destacada, a espessura total do pavimento é igual a 525 mm. O mesmo padrão é observado nas análises dos demais aeroportos.

Para todos eles, existe uma espessura mínima do pavimento simulado no FAARFIELD a partir da qual os dados começam a se repetir. Essa repetição se inicia nos valores mínimos permitidos pelo *software* para a camada de sub-base (igual a 150 mm) e aumenta de forma gradativa, tal como pode ser observado na Tabela 7, para o Aeroporto Regional do Cariri. No caso desta estrutura, a repetição se inicia para a espessura total de 500 mm, na célula correspondente a uma base de 150 mm e sub-base de 220 mm, e se encerra na célula seguinte. Na linha acima, espessura total de 510 mm, são 4 células de repetição. Na seguinte, 515 mm de espessura total, 6 células de repetição, e assim, sucessivamente, com aumento gradativo. Se construída uma tabela grande o suficiente para abranger o valor mínimo da base (125 mm) combinado a grandes espessuras de sub-base (por exemplo, da ordem de 430 mm para o Aeroporto Internacional de Atlanta), essa repetição de valores se iniciará do valor mínimo da base e só se encerrará quando atingir a combinação com o valor mínimo da sub-base. Tal comportamento indica possível existência de análise linear pelo FAARFIELD a partir de determinadas condições de solicitação do tráfego e de espessura total da estrutura. Enquanto essa análise linear, para um aeroporto de pequeno porte como o do Cariri, se inicia a partir de uma espessura mínima do pavimento de 500 mm, para portes maiores, como os aeroportos de Fortaleza, Guarulhos e Atlanta, essas espessuras mínimas são de, respectivamente, 505 mm, 610 mm e 610 mm.

Vale destaque para o fato de que o FAARFIELD faz uma análise similar de vida útil para aeroportos com movimentação consideravelmente diferente. O Aeroporto Regional do Cariri, que teve *mix* considerado com 91,4% a menos de operações que o de Fortaleza, teve uma espessura mínima com apenas 5mm a menos que a apresentada por este último, enquanto que, para Atlanta, que possui 224.000 operações a mais que Guarulhos, um movimento 71,3% maior, a espessura mínima foi considerada igual à adotada pelo programa para as análises lineares do menor.

Os dados apresentados na Tabela 7 mostram, ainda, um outro comportamento diverso. Conforme se diminui a espessura total do pavimento dentro da área onde há a repetição dos valores de vida útil, o valor calculado pelo FAARFIELD para a vida útil aumenta, seja em se mantendo fixa a espessura da base e se diminuindo a dimensão da sub-base ou vice-versa. Essa tendência dos dados é contrária à lógica observada em campo que mostra que, em se mantendo fixo o volume do tráfego, o

pavimento tende a sofrer mais danos conforme se diminui sua espessura, o que o leva a ter uma vida útil menor.

Ainda na Tabela 7, esse aumento cessa tão logo seja cruzada a última célula com valor repetido das linhas diagonais de repetição, pontos a partir dos quais começa a se observar o comportamento esperado para a vida útil do pavimento de ser diminuída à medida que se diminui a espessura total do pavimento. Esse padrão dos dados se repete para todos os quatro *mixes* estudados, e se mantém igual mesmo quando se modificam os materiais das camadas de base e sub-base, o que descarta a hipótese de que esse aumento inicial da vida útil com o decréscimo da espessura do pavimento seja atribuído a características particulares de algum dos materiais da biblioteca interna do FAARFIELD. O Gráfico 1 representa esse comportamento dos dados. Nele, cada linha representa uma espessura de sub-base, sendo a mais à esquerda no trecho vertical correspondente à espessura de 150 mm e a mais à direita, à de 190 mm, mostrando que os dados se comportam de maneira semelhante, independente da espessura assumida pela camada, havendo apenas o deslocamento da curva (de cima para baixo no trecho inicial e da esquerda para a direita no trecho vertical) devido à mudança na espessura total do pavimento. Esse comportamento é o mesmo observado nos gráficos gerados para os demais aeroportos estudados nesse artigo.

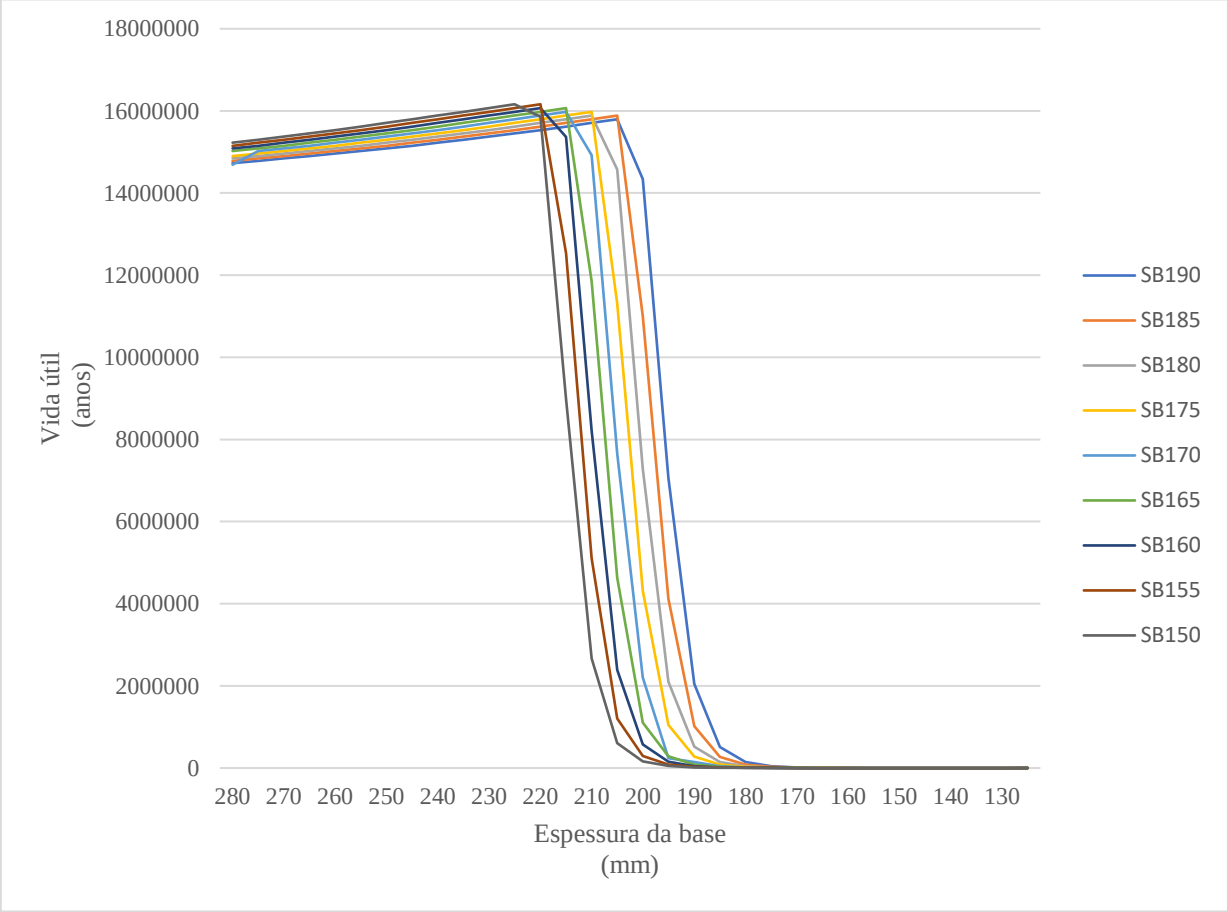


Gráfico 1: Valores de vida útil em função da espessura da base; Aeroporto Regional do Cariri.

Conforme pode ainda ser observado no Gráfico 1, enquanto os dados estão contidos nas áreas onde há a repetição dos valores de vida útil (apresentados na Tabela 7), havendo o aumento da vida útil do pavimento conforme se diminuem as espessuras das camadas, os resultados não são muito sensíveis às mudanças de espessura de base e sub-base. Quando há o acréscimo ou decréscimo de 5 mm na espessura total do pavimento (pela alteração da espessura da base ou da sub-base) para os aeroportos do Cariri, Fortaleza, Guarulhos e Atlanta, os resultados de vida útil sofrem mudanças de apenas 0,51%, 0,19%, 0,17% e 0,22% em média,

respectivamente. A variabilidade dos valores nessa zona é muito baixa, sendo a mais alta a do Aeroporto Regional do Cariri, com valor da ordem de 2,76 x 10^{-6}. Por sua vez, para os valores fora da zona de análise linear, a sensibilidade dos resultados aos *inputs* tem acréscimo considerável. A mudança de 5 mm na espessura total do revestimento, para os aeroportos do Cariri, de Fortaleza, de Guarulhos e de Atlanta, faz os resultados mudarem, em média, 128,81%, 90,59%, 75,81% e 64,93%, respectivamente. A variabilidade dos dados segue o mesmo comportamento de mudança em relação ao aumento do volume de tráfego. Conforme se aumenta o porte do aeroporto, a variabilidade decresce. A variância amostral, para a mesma ordem anterior dos aeroportos, foi de 0,9825, 0,2466, 0,0961 e 0,0650.

Se os dados da Tabela 7 forem analisados na vertical, conforme é decrescida a espessura da camada de base a partir da última célula da linha diagonal de repetição de valores, as mudanças significativas nos dados começam a ocorrer, respectivamente, em 5 mm, 10 mm, 15 mm e 20 mm para os aeroportos do Cariri, Fortaleza, Guarulhos e Atlanta. O Gráfico 2 representa as alterações percentuais médias dos valores de vida útil conforme há o distanciamento dos dados da linha diagonal onde os valores se repetem, na Tabela 7.

Ainda com relação aos dados do Gráfico 2, verifica-se que a sensibilidade dos resultados do FAARFIELD para a vida útil do pavimento tende a ser maior para *mixes* menores de aeroportos de porte pequeno. Conforme se aumenta o porte do aeroporto, o tamanho das aeronaves que compõe o *mix*, bem como o número de operações, a sensibilidade dos resultados de vida útil aos *inputs* diminui, muito embora essa sensibilidade seja alta em qualquer cenário.

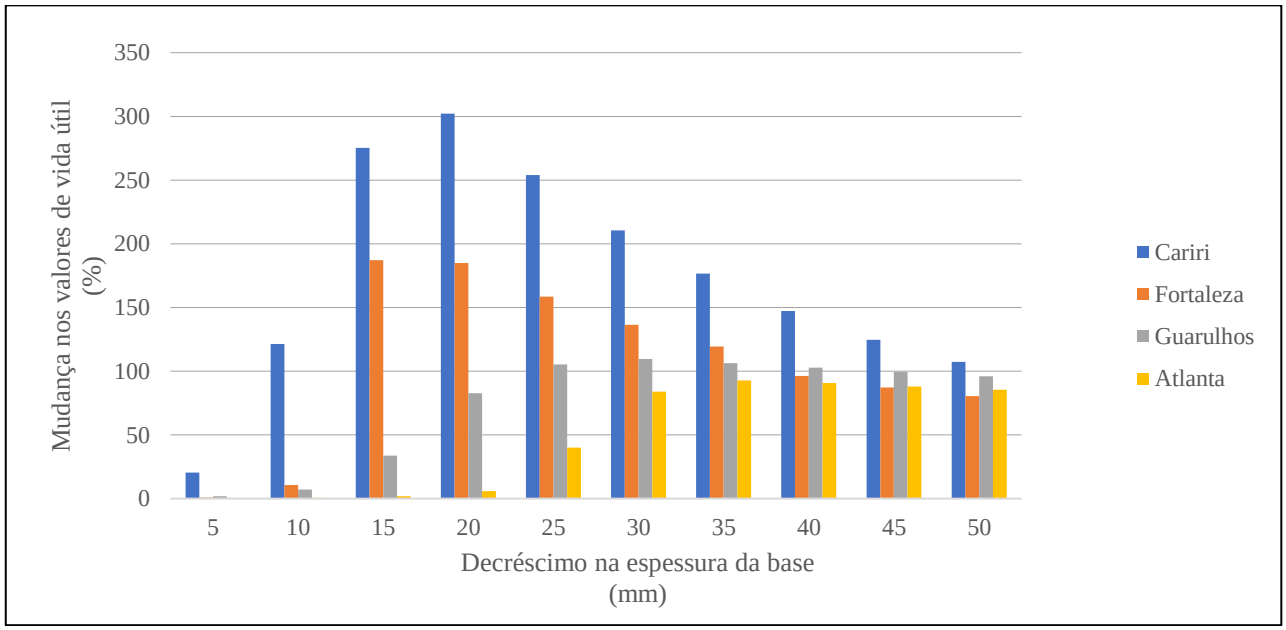


Gráfico 2: Mudança percentual média nos valores de vida útil em função do decréscimo de cada 5 mm na espessura da base.

5. CONCLUSÕES

Considerando a importância de um bom entendimento do comportamento dos dados reportados pelo *software* para um adequado dimensionamento de pavimentos aeroportuários, bem como devido à identificação de variações consideráveis nos resultados a partir de pequenas mudanças nos dados de entrada no programa, o presente artigo avaliou a sensibilidade dos resultados de

vida útil calculados pelo *software* FAARFIELD a partir da variação da espessura das camadas de base e sub-base e de *mixes* de aeronaves pertencentes a aeroportos de porte pequeno, médio, muito grande e de mega aeroporto.

Os resultados mostraram a existência de zona onde o programa, possivelmente, analisa os dados de forma linear, evidenciada pela repetição de valores de vida útil, observada para casos onde as espessuras totais do pavimento são as mesmas, independente da combinação apresentada pelas espessuras das camadas de base e de sub-base. Nessa área, os valores de vida útil do pavimento são altos (da ordem de 10^8 anos), e nela não há sensibilidade dos dados à mudança dos parâmetros de entrada (espessuras das camadas de base e sub-base), com variação dos resultados de apenas 0,57%. No entanto, quando se observaram os valores fora da área de repetição, a sensibilidade aumenta, chegando a diferenças de até 345% para alterações de apenas 5 mm na espessura total do pavimento.

A sensibilidade dos dados depende diretamente do porte do aeroporto, bem como do tamanho do *mix*, do porte e do número de operações das aeronaves. Quanto mais pesado o *mix* e quanto maior o número de operações, menos os dados variam. Por outro lado, quanto maior o aeroporto, menores os valores de vida útil e menor a diferença entre o maior e o menor valor desse parâmetro calculado pelo FAARFIELD para um mesmo aeroporto.

Essa forma de processamento dos dados, no qual o projetista consegue simular cenários variados e visualizar o impacto de cada mudança nos resultados, é um benefício promovido pela evolução dos métodos de dimensionamento. Os novos métodos possibilitam, aos tomadores de decisão, um entendimento mais amplo do comportamento que será apresentado pelas estruturas projetadas após sua construção, fazendo com que as escolhas sejam mais racionais. Nesse sentido, o uso do FAARFIELD tentou ser explorado neste trabalho, buscando contribuir com a compreensão do comportamento do *software* para o projeto de estruturas aeroportuárias que desempenhem de maneira mais efetiva sua função principal de oferecer segurança para as operações de pousos e decolagens.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária (INFRAERO), no Aeroporto Internacional de Fortaleza/CE e no Aeroporto Regional do Cariri, em Juazeiro do Norte/CE, pela disponibilização dos dados de movimento operacional de pousos e decolagens.

6. REFERÊNCIAS

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração.** São Paulo: Oficina de Texto. 2007.

FAA. **Airport Pavement Design and Evaluation – AC n°: 150/5320-6D.** U. S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration. Washington, DC, USA, 1995.

FAA. **Airport Pavement Design and Evaluation – AC n°: 150/5320-6E.** U. S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration. Washington, DC, USA, 2009.

GARG, N.; GUO, E; MCQUEEN, R. **Operational life of airport pavements - DOT/FAA/AR-04/46 Final Report.** Federal Aviation Administration, U.S. Department of Transportation, Springfield, EUA, 2004.

INFRAERO. **Memorial de Cálculo para Implantação de Saída Rápida para a Pista 27L do Aeroporto Internacional de Guarulhos (GRU/SBGR).** Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária, Brasília, 2011.

INFRAERO. **Movimento operacional: Aeroporto Internacional de Fortaleza/CE.** Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária, Fortaleza, 2017.

INFRAERO. **Movimento operacional: Aeroporto Regional de Juazeiro do Norte/CE.** Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária, Juazeiro do Norte, 2019.

KB ENVIRONMENTAL SCIENCES. **Hartsfield-Jackson Atlanta International Airport - Documentation for the CY 2011 Criteria Air Pollutant Emission Inventory.** City of Atlanta/Department of Aviation, Atlanta, EUA, 2014.

OAG AVIATION WORLDWIDE LIMITED. **On-time performance for airlines and airports and TOP 20 busiest routes.** 2018. Disponível em: <https://www.oag.com/hubfs/Free_Reports/Punctuality_League/2018/PunctualityReport2018.pdf>. Acesso em 05 de agosto de 2019.

PURVIS, J. **Sensitivity Analysis of Pavement Thickness Design Software for Local Roads in Iowa.** Dissertação. University of Iowa, Iowa City, EUA, 2013.

RAMOS, B. A. S. **Estudo de casos com o emprego de métodos de dimensionamento de pavimentos aeroportuários da Federal Aviation Administration (FAA).** 2006. Dissertação. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2016.

TAFFE JÚNIOR, E. J. **Uma alternativa econômica quanto ao dimensionamento de pistas de aeródromos.** Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA, 2002, São José dos Campos. *Anais do VIII ENCITA.* São Paulo: 2002. Disponível em: < http://www.bibl.ita.br/viiiencita/>. Acesso em 05 de agosto de 2019.